

**DETERMINACION DE LA TENACIDAD A LA FRACTURA EN ACERO  
1045 MEDIANTE CRECIMIENTO DE GRIETA POR FATIGA**

**JUAN PABLO LEON VELASQUEZ**

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE OCCIDENTE  
FACULTAD DE INGENIERIA  
DEPARTAMENTO DE ENERGÉTICA Y MECÁNICA  
PROGRAMA INGENIERIA MECANICA  
SANTIAGO DE CALI  
2007**

**DETERMINACION DE LA TENACIDAD A LA FRACTURA EN ACERO 1045  
MEDIANTE CRECIMIENTO DE GRIETA POR FATIGA**

**JUAN PABLO LEÓN VELÁSQUEZ**

Pasantia para optar al titulo de  
Ingeniero Mecánico

**Directores**

**NELLY CECILIA ALBA DE SÁNCHEZ, PhD.**  
Docente Dpto. Ciencias Básica de Ingeniería

**HECTOR ENRIQUE JARAMILLO SUÁREZ, M.Sc.**  
Director Programa Ingeniería Mecánica

**Asesor**

**ARMANDO BACCA ROBAYO**  
Ingeniero Mecánico

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE OCCIDENTE  
FACULTAD DE INGENIERIA  
DEPARTAMENTO DE ENERGÉTICA Y MECÁNICA  
PROGRAMA INGENIERIA MECANICA  
SANTIAGO DE CALI  
2007**

**Nota de aceptación:**

Aprobado por el comité de Grado en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Universidad Autónoma de Occidente para optar el título de Ingeniero Mecánico.

**NELLY CECILIA ALBA DE SÁNCHEZ, PhD.**  
Directora.

**HECTOR ENRIQUE JARAMILLO SUÁREZ, M.Sc.**  
Director

Santiago de Cali, Septiembre de 2007

## **AGRADECIMIENTOS**

A mi familia por su constante apoyo a lo largo de mi carrera. A la Dra. Nelly Cecilia Alba de Sánchez y al Profesor. Héctor Enrique Jaramillo Suárez, directores de este trabajo de grado por sus valiosos aportes y el tiempo dedicado a este proyecto de investigación. También al Ingeniero Armando Bacca por su apoyo durante la realización de este trabajo. A mis compañeros del grupo de Ciencia e Ingeniería de Materiales de la Universidad Autónoma de Occidente por el tiempo y las experiencias compartidas.

## CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	11
INTRODUCCIÓN	12
1. MECANICA DE LA FRACTURA	14
1.1 Clases de fractura	15
1.1.1 Fractura dúctil	15
1.1.2 Fractura frágil	17
1.2 MODOS DE DESPLAZAMIENTO DE SUPERFICIES DE FRACTURA EN SÓLIDOS AGRIETADOS	18
1.3 EL FACTOR DE INTENSIDAD DE ESFUERZOS (K)	20
1.3.1 Método para determinar la tenacidad a la fractura de un material $K_{IC}$	21
1.4 LA INTEGRAL J	21
1.5 DESPLAZAMIENTO DE LA APERTURA EN PUNTA DE GRIETA (CRACK TIP OPENING DISPLACEMENT)	23
2. ACERO AISI/SAE 1045 DE PRODUCCION NACIONAL	25
2.1 ANALISIS DE LAS PROPIEDADES DEL ACERO AISI/SAE 1045	26
3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	28
3.1 CALCULO DE LAS DIMENSIONES DE LAS PROBETAS	28
4. DETERMINACIÓN DE LA TENACIDAD A LA FRACTURA	34
4.1 CÁLCULOS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EXPERIMENTALMENTE PARA PROBETAS A TENSIÓN	34
4.1.1. Resultados de las pruebas de la probeta 1 a tracción	36

4.1.2. Resultados de las pruebas de la probeta 2 a tracción	38
4.1.3. Resultados de las pruebas de la probeta 3 a tracción	40
4.2 CÁLCULOS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EXPERIMENTALMENTE PARA PROBETAS A FLEXIÓN	42
4.2.1. Resultados de las pruebas de la probeta 1 a flexión	44
4.2.2. Resultados de las pruebas de la probeta 2 a flexión	46
4.2.3. Resultados de las pruebas de la probeta 3 a flexión	47
4.3. CALCULO DEL VALOR DE TENACIDAD A LA FRACTURA $K_{Ic}$ OBTENIDO POR CORRELACIONES	49
5. PRÁCTICA DE LABORATORIO CRECIMIENTO DE GRIETA POR FATIGA	53
5.1 CRECIMIENTO DE GRIETA EN PROBETAS A FLEXION	54
5.2 CRECIMIENTO DE GRIETA EN PROBETAS A TENSION	56
6. CONCLUSIONES	58
7. PERSPECTIVAS	59
8. RECOMENDACIONES	60
BIBLIOGRAFIA	61

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Composición química	25
Tabla 2. Parámetros para calcular las dimensiones de las probetas	30
Tabla 3. Dimensiones probeta a tensión	32
Tabla 4. Dimensiones probeta a flexión	33
Tabla 5. Datos del ensayo de prefisurado y de tracción	35
Tabla 6. Relaciones entre $a/w$ y $f(a/w)$ probeta a tracción 1	37
Tabla 7. Relaciones entre $a/w$ y $f(a/w)$ probeta a tracción 2	39
Tabla 8. Relaciones entre $a/w$ y $f(a/w)$ probeta a tracción 3	41
Tabla 9. Resultados experimentales de tenacidad a la fractura $K_{IC}$ para las tres probetas	42
Tabla 10. Datos del ensayo de prefisurado y de flexión	43
Tabla 11. Relaciones entre $a/w$ y $f(a/w)$ probeta a flexión 1	45
Tabla 12. Relaciones entre $a/w$ y $f(a/w)$ probeta a flexión 3	48
Tabla 13. Resultados de pruebas de agrietamiento para probetas a flexión	54
Tabla 14. Resultados de pruebas de agrietamiento para probetas compactas	56

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Curva esfuerzo vs. deformación de una fractura dúctil	15
Figura 2. Características de la fractura dúctil	16
Figura 3a. Esquema de una fractura a tracción	16
Figura 3b. Fotografía de fractura de un acero sometido a tracción	16
Figura 4. Curva esfuerzo deformación de una fractura frágil	17
Figura 5a. Esquema de fractura frágil a tracción	18
Figura 5b. Fotografía de fractura frágil de un acero sometido a tracción	18
Figura 6. Modos de deformación de una placa	19
Figura 7a. Placa plana sometida a tensión uniaxial	20
Figura 7b. Diagrama de concentración de esfuerzos	20
Figura 8. Diagrama esfuerzo deformación para un material elastoplástico	22
Figura 9. Balance de energía en punta de grieta	22
Figura 10. Modelo de bisagra para determinar la apertura en punta de grieta	24
Figura 11. Curva esfuerzo deformación acero AISI/SAE 1045 nacional	26
Figura 12. Generador de grieta por fatiga	28
Figura 13. Probeta a flexión	29
Figura 14. Probeta a tensión	29
Figura 15. Dimensiones probeta a flexión	30
Figura 16. Dimensiones probeta a tensión	31



Figura 17. Dimensiones de la entalla	31
Figura 18. Configuración para prueba en tensión del equipo generador de grieta	35
Figura 19. Curva carga Vs alargamiento de la probeta 1 sometida a prueba de tracción	36
Figura 20. Curva carga vs alargamiento de la probeta 2 sometida a prueba de tracción	38
Figura 21. Curva carga vs alargamiento de la probeta 3 sometida a prueba de tracción	40
Figura 22. Montaje del equipo generador de grieta para prueba a flexión	43
Figura 23. Curva carga vs alargamiento de la probeta 1 sometida a prueba de flexión	44
Figura 24. Curva carga vs alargamiento de la probeta 2 sometida a prueba de flexión	46
Figura 25. Curva carga vs alargamiento de la probeta 3 sometida a prueba de flexión	47
Figura 26. Máquina de ensayo Charpy	50
Figura 27. Probeta para ensayo charpy	50
Figura 28. Probetas marcadas para el experimento de crecimiento de grieta	53
Figura 29. Curva crecimiento de grieta vs. tiempo probeta 1 y 2 a flexión	54
Figura 30. Curva crecimiento de grieta vs. tiempo probeta 3 y 4 a flexión	55
Figura 31. Curva crecimiento de grieta vs. tiempo probeta 1 y 2 a tensión	56
Figura 32. Curva crecimiento de grieta vs. tiempo probeta 3 y 4 a tensión	57
Figura 33. Porta probetas a flexión, equipo generador de grieta por fatiga	60

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
Anexo A. Guía de laboratorio determinación de la tenacidad a la fractura $K_{IC}$ en aceros mediante crecimiento de grieta por fatiga.	62

## RESUMEN

El objetivo de este trabajo se basó en el análisis y determinación de la tenacidad a la fractura del acero AISI/SAE 1045 de producción nacional, se utilizó el método de crecimiento de grieta por fatiga. La fatiga es el deterioro progresivo de los materiales que termina produciendo su rotura, cuando un material es sometido a cargas cíclicas. La tenacidad a la fractura es la propiedad que permite determinar si los materiales utilizados, que por lo general presentan defectos, pueden resistir las cargas a las que serán expuestos durante su servicio.

El estudio de la tenacidad a la fractura se realizó en probetas sometidas a esfuerzos de tensión y flexión, de acuerdo a las normas ASTM E399-90 y E1290-89; se utilizó un equipo generador de grieta por fatiga, diseñado y construido por el Grupo de Investigación Ciencia e Ingeniería de Materiales de la Universidad Autónoma de Occidente; con este equipo se aplicó una carga variable a flexión o tensión según el tipo de probeta, lo que produjo un estado de fatiga en éstas y posteriormente una grieta, conforme lo requieren las normas ASTM.

También se utilizaron equipos del laboratorio de mecánica de sólidos como: los medidores de deformación, para controlar la carga aplicada que generar la grieta, la máquina universal de ensayos UTS 200.3; una vez generada la grieta en cada una de las probetas se les aplicó la carga para producir rotura.

El valor de la tenacidad a la fractura obtenido para el acero AISI/SAE 1045 fue de  $62.1 MPa\sqrt{m}$ , valor que se encuentra cercano al valor de la tenacidad a la fractura calculado también por el método de correlaciones que fue de  $54.2 MPa\sqrt{m}$ .

Palabras claves: tenacidad a la fractura, correlación, acero AISI/SAE 1045, flexión, tensión, generador de grieta por fatiga.

## INTRODUCCIÓN

El padre de la mecánica de la fractura es el científico Alan Arnold Griffith quien en el año de 1920 estudió la resistencia mecánica de las fibras de vidrio<sup>1</sup>. Griffith partió del hecho de que un cuerpo deformado elásticamente almacena energía potencial y propuso que esta energía elástica almacenada es la fuerza impulsora del crecimiento de grietas<sup>2</sup>.

La fractura de los materiales por fatiga es un fenómeno que actualmente recibe gran atención por parte de los ingenieros e investigadores en el ámbito nacional e internacional. El interés radica en el hecho que los materiales que se utilizan para fabricar componentes mecánicos presentan defectos o imperfecciones que hacen que las piezas mecánicas no resistan los esfuerzos a que están sometidas y la vida útil se presente por debajo de la que fue diseñada<sup>3</sup>. La fractura o falla inesperada de una pieza mecánica, puede causar problemas que van desde la falla general del sistema mecánico, pérdidas económicas, hasta poner en peligro vidas humanas. Por esta razón, la fractura de los materiales ha sido desde siempre una de las preocupaciones de los ingenieros.

En la región del Valle del Cauca y en Colombia poco se ha trabajado en la determinación de la tenacidad a la fractura del acero AISI/SAE 1045 a pesar de ser uno de los aceros más utilizados en la industria nacional; razón por la cual este trabajo se centra en la determinación de la tenacidad a la fractura de este acero con el fin de disponer de referentes locales de esta propiedad. Debido a que los procesos de producción de acero a nivel nacional son diferentes de los procesos utilizados en países industrializados, es muy importante disponer de referentes locales para propiedades como la tenacidad a la fractura. Con el conocimiento de estas propiedades se podrán realizar diseños confiables de piezas mecánicas a utilizar en los diferentes proyectos mecánicos.

---

<sup>1</sup> MEIZOSO, Antonio Martin; MARTINEZ, Jose Manuel. Mecánica de la Fractura. España: ©Los autores, 1999. p. 1.

<sup>2</sup> GONZALEZ, J. L. Mecánica De Fractura bases y aplicaciones. México: Editorial Limusa S.A, 2000. p. 34.

<sup>3</sup> CAÑIZALES, Juan Pablo; TORO, Álvaro José; JARAMILLO SUÁREZ, Héctor Enrique; ALBA DE SÁNCHEZ, Nelly Cecilia. Introducción a la Mecánica de la Fractura y Análisis de Fallas. Cali: Universidad Autónoma de Occidente, 2006. p. 28.

El objetivo general de este proyecto fue determinar la tenacidad a la fractura del acero AISI/SAE 1045 de fabricación nacional; mediante el método de crecimiento de grieta por fatiga.

A partir del objetivo general y como complemento a este proyecto se plantearon los siguientes objetivos específicos.

- Realizar ensayos de crecimiento de grieta por fatiga en probetas de acero **AISI/SAE 1045** tipo flexión y tracción de acuerdo a las normas ASTM E399-90 y E1290-89.
- Analizar el crecimiento de grieta por fatiga en las probetas de acero **AISI/SAE 1045** utilizando la maquina universal de ensayos, para la determinación de la tenacidad a la fractura.
- Realizar una guía de laboratorio para estandarizar y documentar los procedimientos seguidos durante este trabajo de investigación.

## 1. MECANICA DE LA FRACTURA

La fractura o falla inesperada de una pieza mecánica puede causar problemas que van desde la falla general del sistema mecánico, pérdidas económicas, hasta poner en peligro vidas humanas. Por esta razón, la fractura de los materiales ha sido desde siempre una de las preocupaciones de los ingenieros. Esto ha conducido a que se realice un trabajo intenso para determinar las propiedades de los materiales que le permitan al diseñador contar con información confiable para seleccionar los materiales adecuados para los diferentes diseños que debe realizar.

De forma simplificada, la fractura se define como la separación de un sólido sometido a una carga externa<sup>4</sup>. Usualmente para fragmentar un sólido se requiere incrementar la carga progresivamente hasta que ocurre un proceso de nucleación; formación de una pequeña fisura de tamaño inferior a la micra y propagación de grietas. La grieta es una fisura o discontinuidad en un componente mecánico que generalmente produce:

- Disminución de la capacidad para soportar cargas.
- Disminución de la vida útil.
- Mal desempeño y riesgo de falla.

Griffith realizó experimentos estudiando la resistencia mecánica de las fibras de vidrio y realizó un análisis matemático del fenómeno de la fractura, lo que le permitió determinar una expresión para calcular el esfuerzo de fractura en materiales muy frágiles. Además propone que un material deformado elásticamente almacena energía potencial y esta energía elástica almacenada es la fuerza que impulsa el crecimiento de grietas, siempre y cuando la energía elástica almacenada sea suficiente para suplir la demanda que requiere la extensión de grieta.<sup>5</sup>

El propósito principal de la mecánica de la fractura se basa en determinar las combinaciones críticas de tres variables relativas a un componente mecánico: la tensión aplicada, el tamaño de los defectos que contiene y la tenacidad a la fractura del material. Por lo tanto podría decirse que la mecánica de fractura es la disciplina del conocimiento que permite realizar análisis, diseño y evaluación de componentes mecánicos y estructurales, con la finalidad de que la vida en servicio

---

<sup>4</sup> GONZALEZ, Op. cit., p. 21.

<sup>5</sup> CAÑIZALES, Op. cit., p. 28.

sea mayor y que estos componentes puedan resistir las cargas para las cuales han sido diseñados y fabricados.

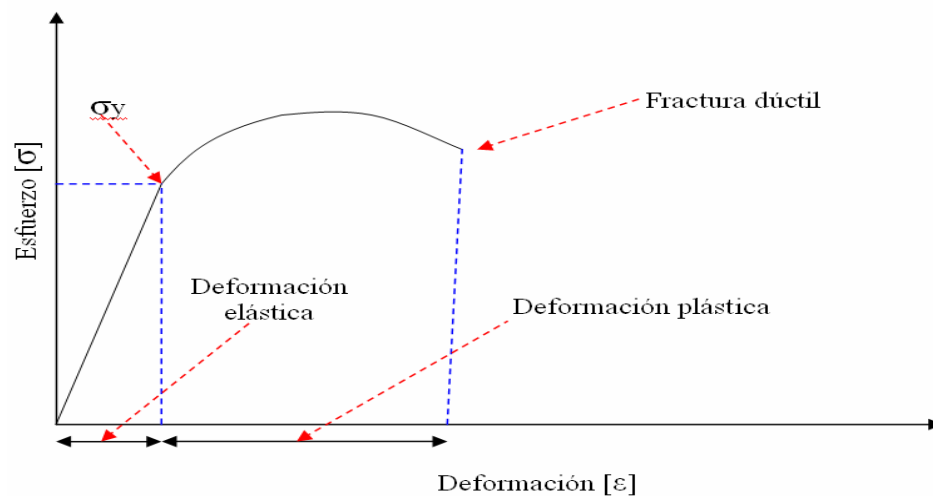
Los materiales utilizados en ingeniería poseen defectos tales como grietas, fisuras e incrustaciones, estos materiales al ser sometidos a esfuerzos pueden presentar fractura.

## 1.1. CLASES DE FRACTURA

Las fracturas pueden clasificarse principalmente en frágiles y dúctiles:

**1.1.1. Fractura dúctil.** Esta ocurre después que se ha presentado una gran deformación plástica del material superando el esfuerzo de fluencia. En la figura 1 se presenta la grafica esfuerzo versus deformación unitaria de un material con mediana ductilidad .

Figura 1. Curva esfuerzo vs. deformación de una fractura dúctil

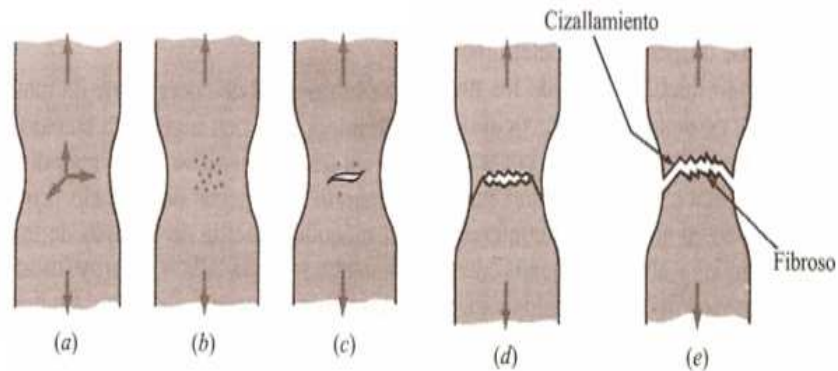


Las características para identificar la presencia de una fractura dúctil se enumeran a continuación, en la figura 2 se muestra la forma característica de este tipo de fractura.

- Se observa un cuello o estiramiento en la región de la fractura.
- Se forman cavidades en la región del cuello.
- Las cavidades del cuello forman una grieta en el centro de la muestra y se propagan a lo largo de la superficie en dirección perpendicular a la tensión aplicada.

- Cuando la grieta se acerca a la superficie, la dirección de la grieta cambia a  $45^\circ$  con respecto al eje de tensión y da lugar a una fractura de cono y embudo
- La superficie de la fractura presenta un aspecto sedoso y opaco.

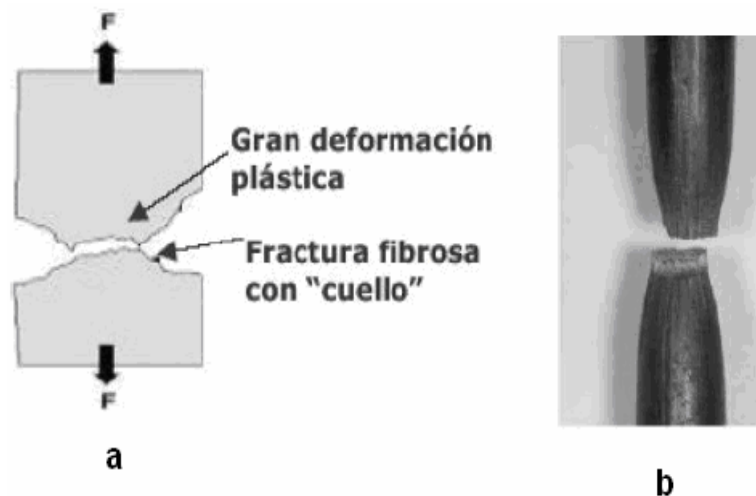
Figura 2. Características de la fractura dúctil.



Fuente: SMITH, William F. Fundamentos De La Ciencia e Ingeniería de Materiales. 3 ed. Madrid: McGraw-Hill, 1998. p. 241.

Las figuras 3a y 3b muestran las características de la fractura dúctil a tracción.

Figura 3. Fractura dúctil a) Esquema de una fractura a tracción. b) Fotografía de fractura de un acero sometido a tracción



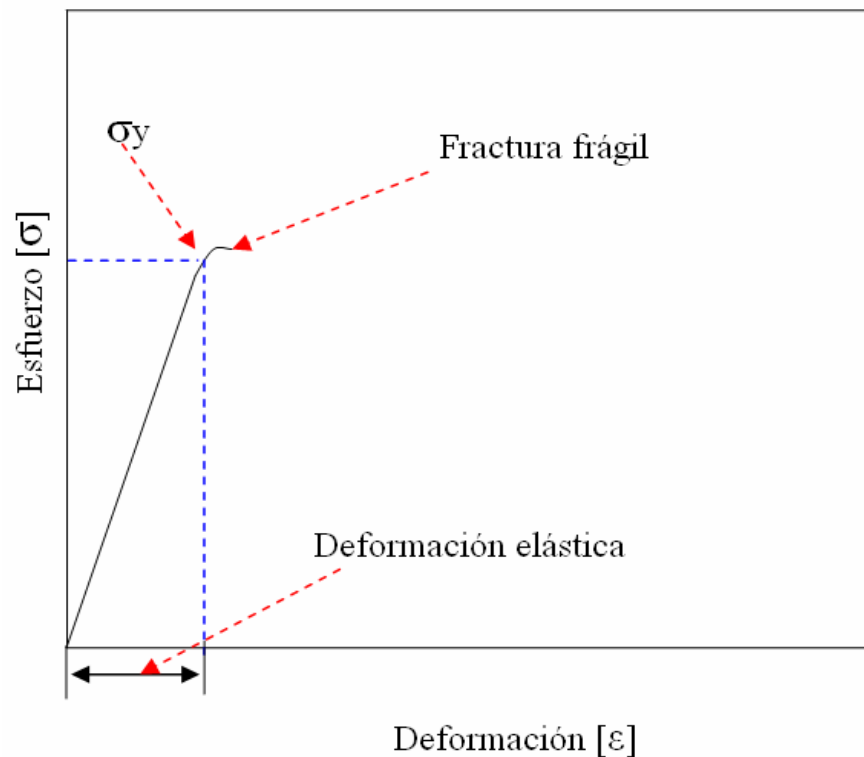
Fuente: CAÑIZALES, Juan Pablo; TORO, Álvaro José; JARAMILLO SUÁREZ, Héctor Enrique; ALBA DE SÁNCHEZ, Nelly Cecilia. Introducción a la Mecánica de la Fractura y Análisis de Fallas. Cali: Universidad Autónoma de Occidente, 2006. p. 28.



**1.1.2. Fractura frágil.** La fractura frágil se produce cuando el material ha presentado una pequeña o ninguna deformación plástica como se observa en la grafica esfuerzo vs deformación de la figura 4; esta fractura se reconoce fácilmente por que después de la fractura los elementos pueden volver a unirse sin que se observen cambios significativos en la geometría. Se cree que la fractura frágil de los metales se compone de tres fases<sup>6</sup>.

- La deformación plástica concentra las dislocaciones a lo largo de los planos de deslizamiento en los puntos obstáculo.
- Los esfuerzos de corte se intensifican en lugares donde las dislocaciones están bloqueadas y como resultado se bloquean las microgrietas.
- Una tensión nueva propaga las microgrietas, y la energía de tensión elástica almacenada puede también contribuir a la propagación de fisuras.

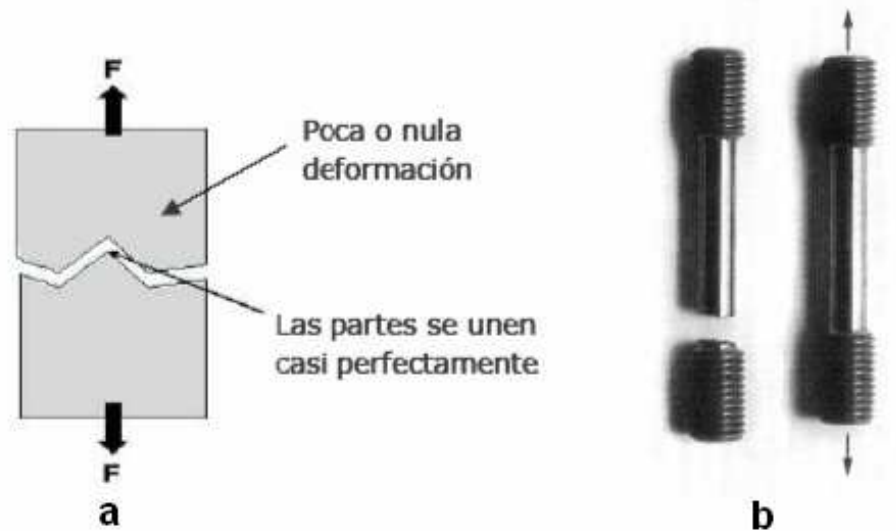
Figura 4. Curva esfuerzo deformación de una fractura frágil.



<sup>6</sup> Ibíd., p. 29.

En las figuras 5a y 5b se observa la fractura frágil de un acero sometido a tracción.

Figura 5. Fractura frágil a) Esquema de fractura a tracción, b) Fotografía de fractura frágil de un acero sometido a tracción.



Fuente: 5a) CAÑIZALES, Juan Pablo; TORO, Álvaro José; JARAMILLO SUÁREZ, Héctor Enrique; ALBA DE SÁNCHEZ, Nelly Cecilia. Introducción a la Mecánica de la Fractura y Análisis de Fallas. Cali: Universidad Autónoma de Occidente, 2006. p. 29.

5b) NORTON L, Robert. Diseño De Maquinas. México: Prentice Hall; Pearson, 1999. p. 63.

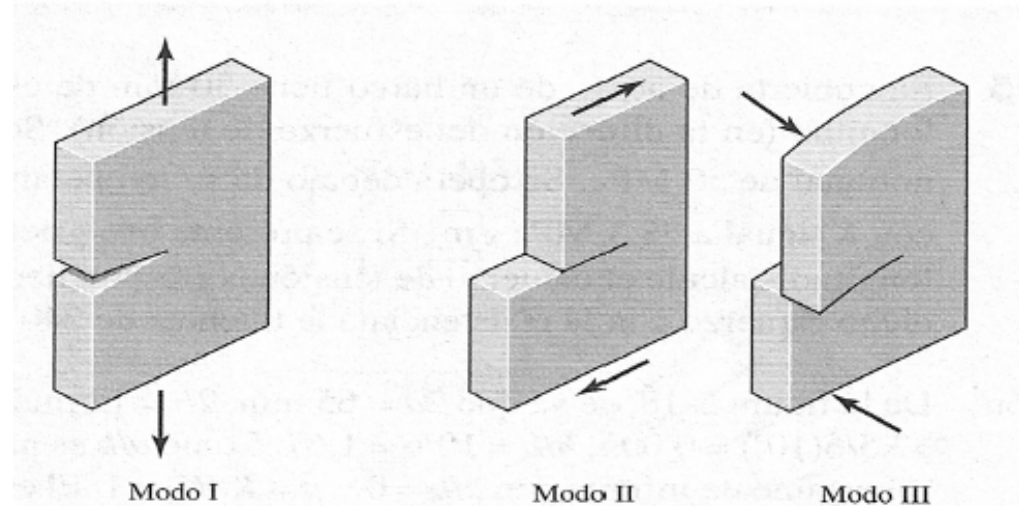
## 1.2. MODOS DE DESPLAZAMIENTO DE SUPERFICIES DE FRACTURA EN SÓLIDOS AGRIETADOS

La mecánica de la fractura se apoya en el cálculo del campo de esfuerzos y deformaciones alrededor de una grieta, estos provocan desplazamientos relativos de las superficies de fractura en un cuerpo agrietado.<sup>7</sup> La figura 6 muestra los tres modos básicos de falla.

---

<sup>7</sup>Ibíd., p. 28

Figura 6. Modos de deformación de una placa.



Fuente: SHIGLEY E. Joseph; MISCHKE R. Charles. Diseño en Ingeniería Mecánica. México: Mc Graw Hill, 2002. p. 294.

Modo I: Las superficies de la grieta se separan una de otra de forma perpendicular al plano de fractura, esto ocurre cuando un cuerpo está sometido a tracción o flexión pura.

Modo II: Las superficies de grieta se deslizan una sobre otra en sentido opuesto pero en dirección al avance de grieta, esto ocurre cuando se presenta el caso de cortante transversal; por ejemplo en un torno cuando la cuchilla separa viruta del material maquinado.

Modo III: Las superficies se deslizan en dirección opuesta una de otra pero hacia fuera del plano y de forma perpendicular al avance de grieta. Este modo se presenta cuando el cuerpo se somete a torsión pura.

En adelante se estudiará la mecánica de la fractura aplicada al modo de falla I por ser de mayor interés para realizar las pruebas normalizadas que buscan hallar el valor de la tenacidad a la fractura del acero AISI/SAE 1045.

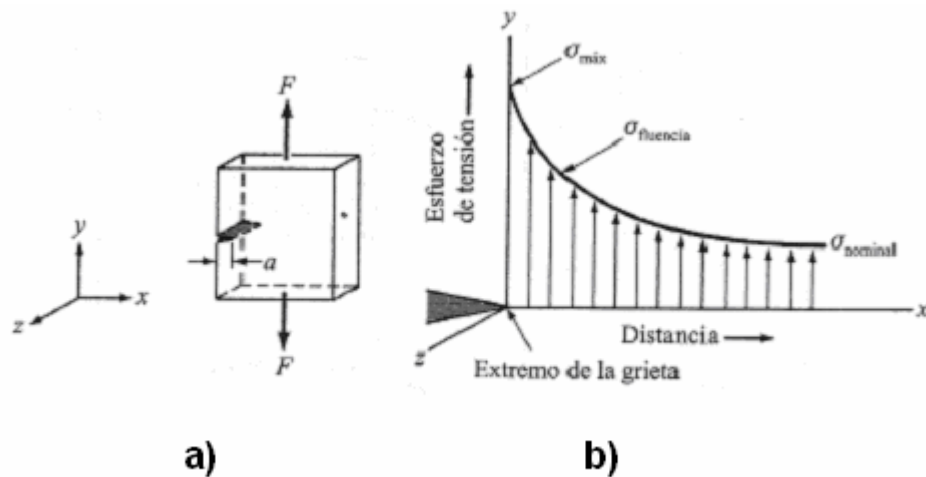
La mecánica de la fractura proporciona parámetros que son de utilidad cuando se analiza la integridad de un componente mecánico. Dichos parámetros son:

- El factor de intensidad de esfuerzos **K**
- La integral **J**
- El desplazamiento de abertura en punta de grieta **CTOD**

### 1.3. EL FACTOR DE INTENSIDAD DE ESFUERZOS K

La fractura de un material comienza en el lugar donde la concentración de esfuerzos es lo más grande posible, como puede ser la punta de una grieta. Un ejemplo de esto sería una muestra en forma de placa bajo tensión uniaxial como se muestra en la figura 7a, la tensión en la grieta es mayor en la punta de esta como se indica en la figura 7b.

Figura 7. a) Placa plana sometida a tensión uniaxial. b) Diagrama de concentración de esfuerzos.



Fuente: SMITH, William F. Fundamentos De La Ciencia e Ingeniería de Materiales. 3 ed. Madrid: Mc Graw Hill, 1998. p. 244.

La intensidad de la tensión en la punta de la grieta es dependiente tanto de la tensión aplicada como de la longitud de grieta. El factor de intensidad de esfuerzo o de tensión **K<sub>I</sub>** se utilizará para expresar la combinación de los efectos de la tensión en la punta de grieta y la longitud de la grieta. El subíndice **I** indica el modo **I** de desplazamiento previamente citado.

Mediante experimentación, para el caso de una tensión uniaxial sobre una placa de metal que contiene una grieta en el borde se ha encontrado que:

$$K_I = Y\sigma\sqrt{\pi a} \quad (1)$$

Donde:

**K<sub>I</sub>** = Factor de intensidad de tensión o esfuerzos.

**σ** = Tensión aplicada.

**a** = Longitud de la grieta.

**Y** = Constante geométrica adimensional del orden de 1.

El valor crítico de intensidad de esfuerzos que causa la fractura de la placa se denomina tenacidad a la fractura (**K<sub>IC</sub>**). Si **K<sub>I</sub> > K<sub>IC</sub>** ocurrirá la fractura.

### **1.3.1. Método para determinar la tenacidad a la fractura de un material K<sub>IC</sub>.**

Existen varias técnicas para determinar el factor de intensidad de esfuerzos, estas se pueden agrupar en cuatro métodos principalmente:

- Solución analítica
- Métodos numéricos (elementos finitos, integral de limite)
- Métodos experimentales (complianza, fotoelasticidad, extensometría )
- Métodos indirectos (propagación de grieta por fatiga, fractográfico)

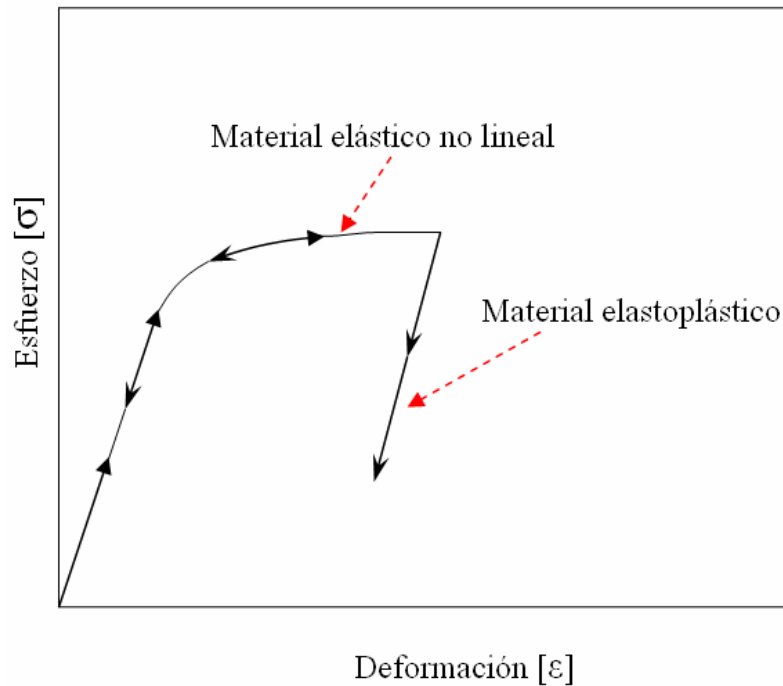
## **1.4. LA INTEGRAL J**

La integral J la presentó Rice para caracterizar la fractura de un material elástico no lineal. Como el comportamiento de un material elastoplástico es similar al de un material elástico no lineal, la integral **J** se utiliza para caracterizar la fractura de materiales con un comportamiento elastoplástico. En la figura 8 se representa la curva esfuerzo – deformación para un material elástico no lineal y para un material elastoplástico. La diferencia entre estos dos materiales radica en que para el material elástico no lineal al retirar la carga, la descarga se realiza siguiendo la misma curva, mientras que para el material elastoplástico sigue el camino de pendiente igual al modulo de Young del material<sup>8</sup>.

---

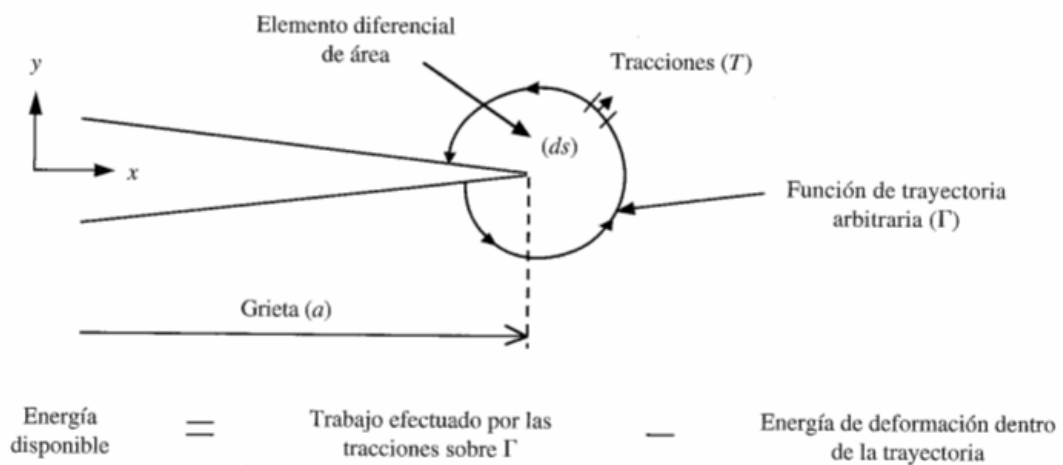
<sup>8</sup> Ibíd., p. 80

Figura 8. Diagrama esfuerzo deformación para un material elastoplástico.



La interpretación física de la integral  $J$  es que proporciona un balance de energía en la punta de grieta, ver figura 9

Figura 9. Balance de energía en punta de grieta.



Fuente: GONZÁLES, J. Mecánica de la fractura bases y aplicaciones. México: Noriega editores S.A., 2000. p. 85.

La integral **J** se determina a partir de:

$$\int_{\Gamma} \left[ W dy - T \frac{dU}{dS} dS \right] = 0 \quad (2)$$

Donde:

**T** = Tracción sobre un elemento de superficie  $dS$ .

**U** = Energía de deformación almacenada en el cuerpo.

**W** = Trabajo efectuado para extender la grieta.

### 1.5. DESPLAZAMIENTO DE LA APERTURA EN PUNTA DE GRIETA (CRACK TIP OPENING DISPLACEMENT)

El desplazamiento de la apertura en punta de grieta es el parámetro que refleja el comportamiento de la deformación elástico plástico en la vecindad de la extremidad de la grieta, basándose en la medida de la apertura de punta de grieta, esta tiende a abrirse produciéndose un desplazamiento normal entre las superficies de la grieta. Este desplazamiento en la punta de la grieta es conocido como CTOD.<sup>9</sup>

Cuando el desplazamiento alcanza un valor crítico CTOD<sub>c</sub> se produce la fractura por propagación de grieta; el valor crítico de este, se determina experimentalmente bajo condiciones lineales elásticas mediante la siguiente ecuación.

$$CTOD = \frac{4}{\pi} * \frac{K_I^2}{E \sigma_y} \quad (3)$$

Donde:

**CTOD** = Desplazamiento de la apertura en punta de grieta.

**K<sub>I</sub>** = Factor de intensidad de esfuerzos.

**E** = Modulo de elasticidad del material.

El CTOD puede ser usado como criterio de fractura sin limitaciones por condiciones de linealidad, ni de plasticidad; además puede aplicarse a grietas cortas y materiales de alta tenacidad; ha sido usado especialmente para determinar la tenacidad a la fractura en soldaduras.

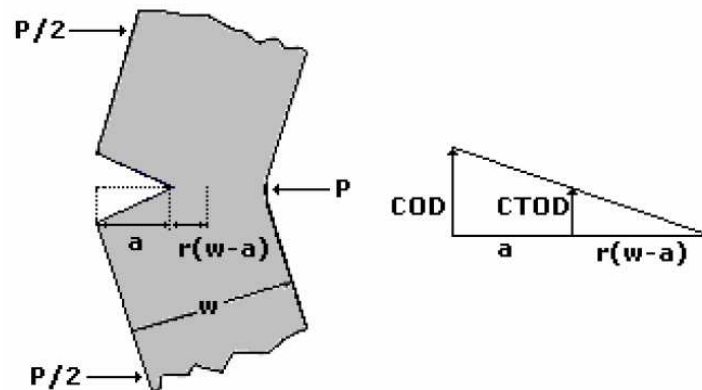
El CTOD se calcula experimentalmente, midiendo la apertura de la entalla maquinada, con un clip Gauge especificado en el anexo A1 de la norma ASTM

---

<sup>9</sup> VEDIA, L. A. Mecánica de Fractura. Argentina: publicación del proyecto multinacional de metalurgia OEA-CNEA, 1986. p. 122.

E399-90; para hallar la apertura en la punta de grieta se usa la relación lineal de los lados de un triángulo semejante. En la figura 10 se observa el procedimiento donde se asume que todo el ligamento está plastificado y actúa como una bisagra con el centro de rotación a  $0.4 (W-a)$  desde la punta de grieta.

Figura 10. Modelo de bisagra para determinar la apertura en punta de grieta.



Fuente: ANGLADA, MJ; LLANE, L.M Y MATEO. MN. Fractura de materiales. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña, 2002. p. 151.



## 2. ACERO AISI/SAE 1045 DE PRODUCCION NACIONAL

En este trabajo se utilizó el acero AISI/SAE 1045 de fabricación nacional producido por Sidelpa S.A, se fabricaron probetas estandarizadas; tipo flexión y tensión, se sometieron a crecimiento de grieta por fatiga en el prefisurador y luego se les realizó prueba de tensión y flexión en la máquina universal de ensayos UTS 200.3 para determinar la tenacidad a la fractura.

El acero AISI/SAE 1045 es un acero simple al carbono con un contenido del mismo de aproximadamente 0.45%. Se utiliza sin tratamiento térmico en fabricación de piezas de maquinaria tales como barras de pistón, piezas de embragues, engranajes, árboles, tornillos, ejes, pernos, husillos y especialmente en la industria azucarera en la fabricación de mazas, bases de troqueles y moldes para sustituir el hierro. En la tabla 1 se presenta el análisis químico del acero en estudio.

Tabla 1. Composición química

Composición química del acero AISI/SAE 1045 de producción nacional.				
C (%)	Si (%)	Mn (%)	S (%)	P (%)
0.45	0.30	0.70	0.035 máx.	0.030 máx.

### Conformación en caliente y tratamiento térmico.

De acuerdo al catálogo de Sidelpa<sup>10</sup> las indicaciones para realizar tratamientos térmicos a este acero se especifica de la siguiente manera.

- **Normalizado:**

840 - 870 °C Enfriar al aire

- **Recocido blando :**

650-700°C por cada 2 a 4 horas enfriar en el horno.

- **Temple:**

820 -850°C – medio: agua .- dureza:HRC 54-60

830 - 860°C – medio: aceite –dureza:HRC 48-56

---

<sup>10</sup> SIDELPA S.A.. Catalogo Aceros Especiales. Cali: Editora Nicholl's Publicidad, 1990. p. 32.

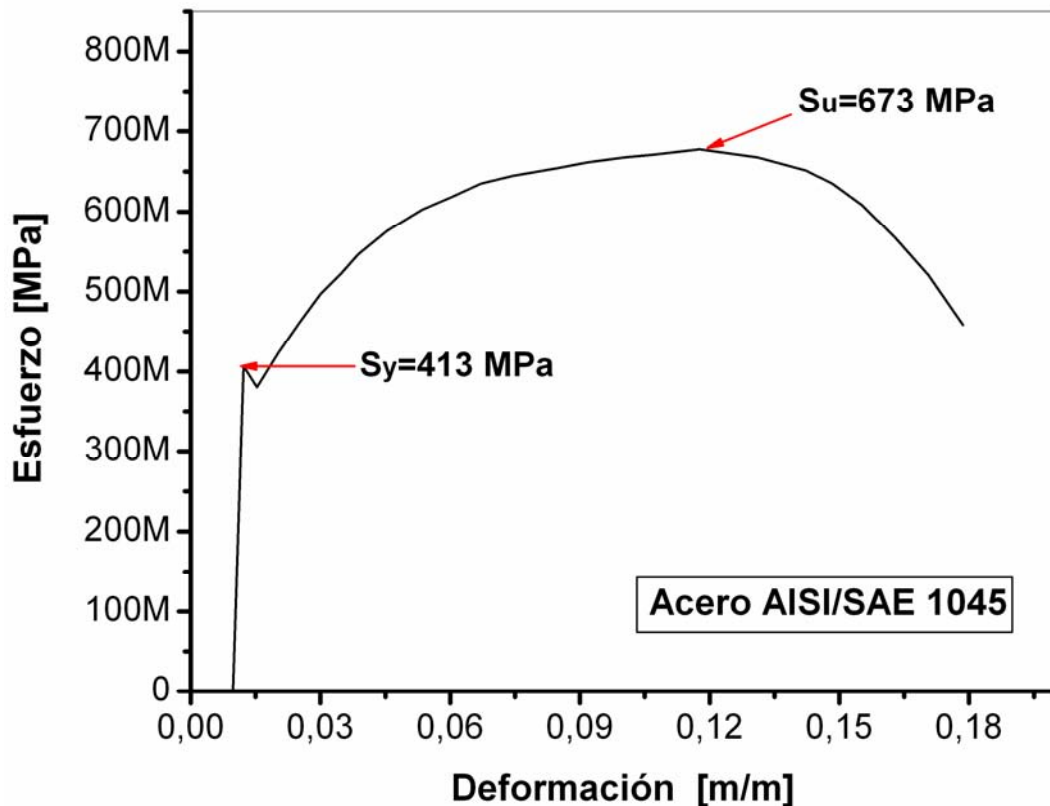
- **Revenido:**

450 -670°C según la resistencia deseada, tiempo de saturación a temperatura de revenido. Un minuto por cada milímetro de espesor. Tiempo mínimo: 30 minutos.

## 2.1. ANALISIS DE LAS PROPIEDADES DEL ACERO AISI/SAE 1045

En la figura 11 se presenta la curva esfuerzo - deformación del acero AISI/SAE 1045 en estado de suministro obtenida de la prueba de tensión, que permitió determinar el esfuerzo de fluencia y el esfuerzo ultimo. Se realizaron tres ensayos y se tomó en cuenta la grafica que presentó valores intermedios.

Figura 11. Curva esfuerzo deformación acero AISI 1045 nacional.



Del diagrama  $\sigma - \epsilon$  se obtuvo que:

$S_y$  = Esfuerzo de fluencia

$S_u$  = Esfuerzo ultimo

El acero AISI/SAE 1045, es ampliamente utilizado en la industria nacional y regional. Por esta razón es de gran interés para los diseñadores e ingenieros conocer ampliamente las características y propiedades de este acero especialmente en aspectos sobre los que se tienen poca información como es el caso de la tenacidad a la fractura.

### 3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Para obtener los valores de tenacidad en materiales metálicos la Sociedad Americana de Prueba de Materiales ASTM (American Society for Testing Materials) ha establecido ensayos normalizados que garanticen resultados confiables; estos ensayos se basan en las normas ASTM E399-90 y E1290-89. En el laboratorio del Grupo Ciencia e Ingeniería de Materiales de la Universidad Autónoma de Occidente se cuenta con un equipo generador de grieta por fatiga especialmente diseñado y construido para operar bajo estas normas, en la figura 12 se presenta una fotografía del equipo mencionado.

Figura 12. Generador de grieta por fatiga.



Fuente: Archivo fotográfico grupo GCIM. Cali, 2005.

#### 3.1. CALCULO DE LAS DIMENSIONES DE LAS PROBETAS

El primer paso para determinar la tenacidad a la fractura del acero AISI/SAE 1045 se basó en obtener las probetas estandarizadas que cumplieran con los requerimientos de la norma establecida por la ASTM; según esta norma se puede trabajar con dos tipos de probetas, a flexión y a tensión, las diferentes geometrías de las probetas se muestran en las figuras 13 y 14. Las dos clases de probetas se utilizaron en el desarrollo de este trabajo.

Figura 13. Probeta a flexión.

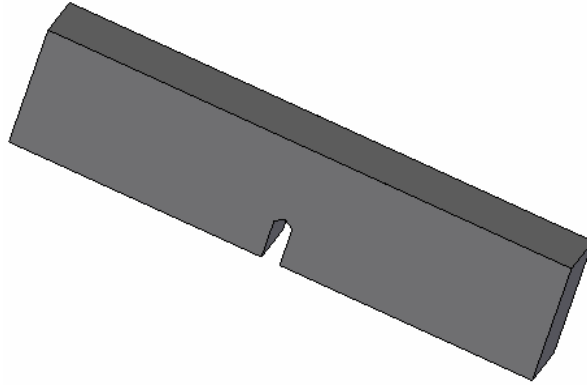
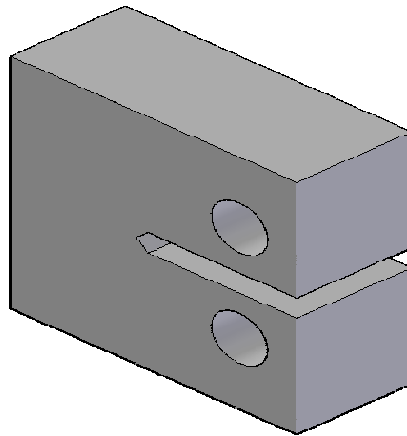


Figura 14. Probeta a tensión.



Estas probetas deben estar dentro de un rango de dimensiones que asegure que se presente la condición de deformación plana. Para materiales metálicos se recomienda que el largo de la probeta **W** sea aproximadamente de 25mm<sup>11</sup>; con este dato y las relaciones que recomienda la norma ASTM 399-90 y que se presentan en la tabla 2 y las dimensiones especificadas en las figuras 15 y 16 se calcularon las dimensiones restantes de las probetas.

---

<sup>11</sup> GONZÁLES, J. L. Mecánica de fractura. 2 ed. México: Noriega editores S.A., 2004. p. 71.

Tabla 2. Parámetros para calcular las dimensiones de las probetas

Rango de valores para probetas
$0.25W \leq M \leq 0.45W$
$0.45W \leq a \leq 0.55W$
$n \leq 0.025W$

Donde:

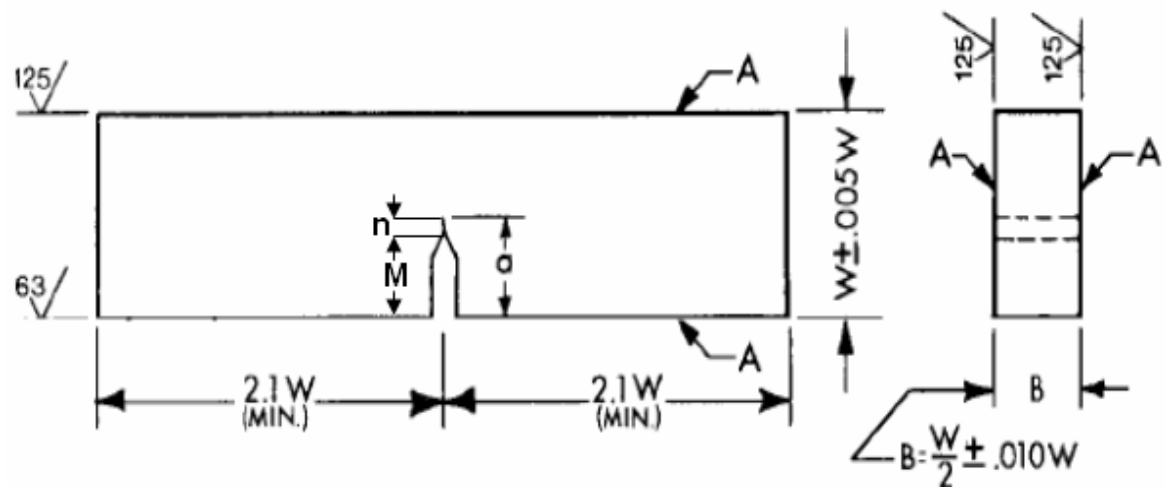
**W** = Para la probeta a tracción; Longitud desde el centro del agujero hasta el borde de la probeta. Para la probeta a flexión; representa el alto de la probeta.

**M** = Longitud de la entalla.

**n** = Longitud de la grieta.

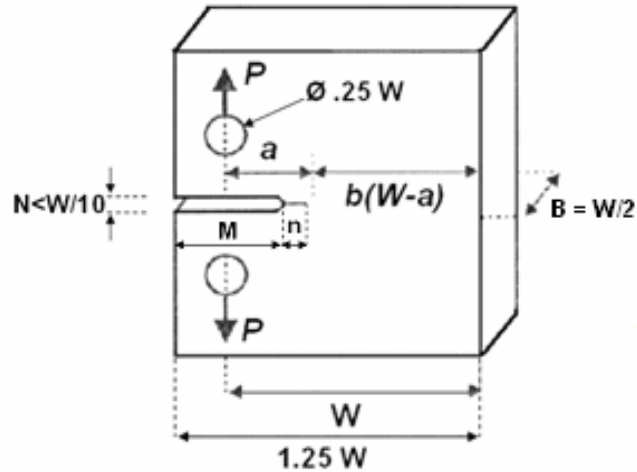
**a** = Longitud de la entalla mas la longitud de grieta.

Figura 15. Dimensiones probeta a flexión.



Fuente: ASTM. Annual Book of ASTM Standard: E 399-90 "Estándar Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials". Estados Unidos: ASTM, 1986. p. 13.

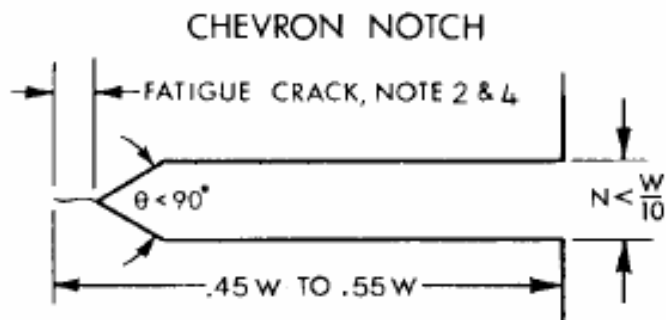
Figura 16. Dimensiones probeta a tensión.



Fuente: ASTM. Annual Book of ASTM Standard: E 399-90 "Estándar Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials". Estados Unidos: ASTM, 1986. p. 128.

Para calcular las dimensiones de la entalla tanto en la probeta a tensión como en la probeta a flexión; que es el punto a partir del cual se generará la grieta, la norma ASTM E399-90 recomienda lo siguiente.

Figura 17. Dimensiones de la entalla.



Fuente: ASTM. Annual Book of ASTM Standard: E 399-90 "Estándar Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials". Estados Unidos: ASTM, 1986. p. 16.

En la tabla 3 y 4 se presenta un resumen de las dimensiones calculadas para las probetas a tensión y flexión respectivamente.

Tabla 3. Dimensiones probeta a tensión

Parámetros	Símbolo	Dimensiones (mm)
Espesor de la probeta	<b>B</b>	10,9
Longitud total de la probeta	1,25 <b>W</b>	27,2
Longitud del borde posterior de la probeta al centro del agujero	<b>W</b>	21,7
Altura de la probeta	<b>H</b>	26,1
Diámetro de los agujeros	<b>Ø</b>	5,4
Ancho de la entalla	<b>N</b>	2,2
Longitud de la entalla	<b>M</b>	9,8
Longitud de la grieta según la norma ASTM E399-90	<b>n</b>	>1,3
Distancia desde los centros de los agujeros a la punta de grieta	<b>a</b>	11,1
Ligamento de la probeta	<b>b<sub>0</sub> = (W-a)</b>	10,6



Tabla 4. Dimensiones probeta a flexión.

Parámetros	Símbolo	Dimensiones (mm)
Espesor de la probeta	<b>B</b>	9,5
Altura de la probeta	<b>W</b>	19,1
Longitud de la probeta	<b>4,2 W</b>	79,9
Longitud entre apoyos	<b>S</b>	76,2
Ligamento de la probeta	<b><math>b_0 = (W-a)</math></b>	9,7
Ancho de la entalla	<b>N</b>	1,9
Longitud de la entalla	<b>M</b>	8,0
Longitud de la grieta según la norma ASTM E399-90	<b>n</b>	>1,3
Longitud de la entalla más longitud de grieta	<b>a</b>	9,3

## 4. DETERMINACIÓN DE LA TENACIDAD A LA FRACTURA

### 4.1. CÁLCULOS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EXPERIMENTALMENTE PARA PROBETAS A TENSION

Una vez se obtuvieron las probetas a tensión se procedió a generar la grieta por fatiga, para lo cual se montaron en el equipo generador de grieta por fatiga como se muestra en la figura 18 y se les aplicó una carga que según la norma ASTM 1290 no debe ser superior a la carga de prefisurado que se calcula por medio de la ecuación 4.

$$Pf = 0.4 * \left( \frac{Bb_0^2 \sigma_y}{2W + a_0} \right) \quad (4)$$

Donde:

**Pf** = Carga de prefisurado

**a<sub>0</sub>** = Tamaño de grieta inicial

**B** = Espesor de la probeta

**b<sub>0</sub>** = Ligamento de la probeta

**W** = Ancho de la probeta

$$\sigma_y = \left( \frac{S_{ut} + S_y}{2} \right) \quad (5)$$

Donde:

**S<sub>ut</sub>** = Esfuerzo ultimo a tensión del material.

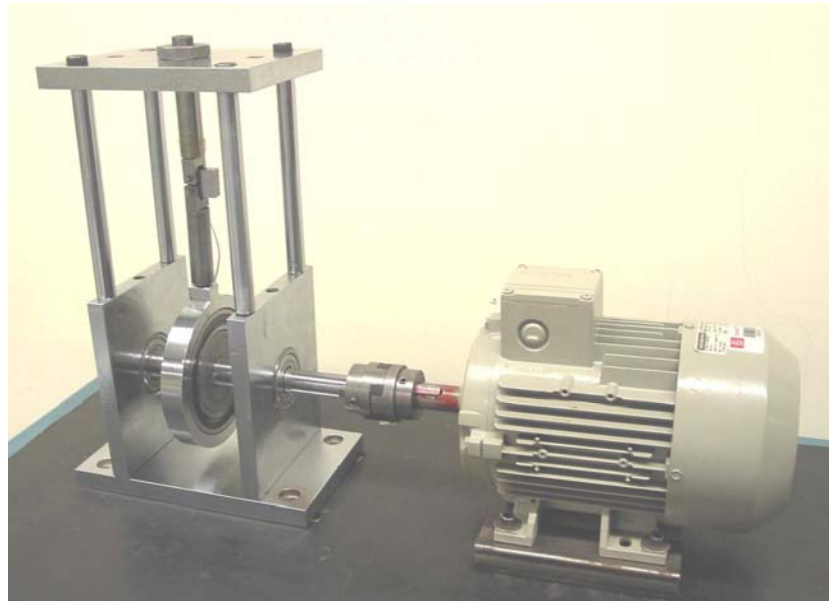
**S<sub>y</sub>** = Esfuerzo de fluencia del material.

Remplazando los valores de las dimensiones de las probetas y el tamaño de la grieta medido experimentalmente se obtiene un valor de carga de prefisurado de:

$$Pf = 0.4 * \left( \frac{10.9 * (10.66)^2 * 543.9}{2 * 21.74 + 1.3} \right) = 5776.36N \quad (6)$$

El valor de 5776.36 N es el valor máximo a usar de carga de prefisurado, se decidió trabajar con una carga de 3000 N para mayor seguridad y evitar deformaciones plásticas excesivas.

Figura 18. Configuración para prueba en tensión del equipo generador de grieta.



Fuente: Archivo fotográfico grupo GCIM. Cali, 2004.

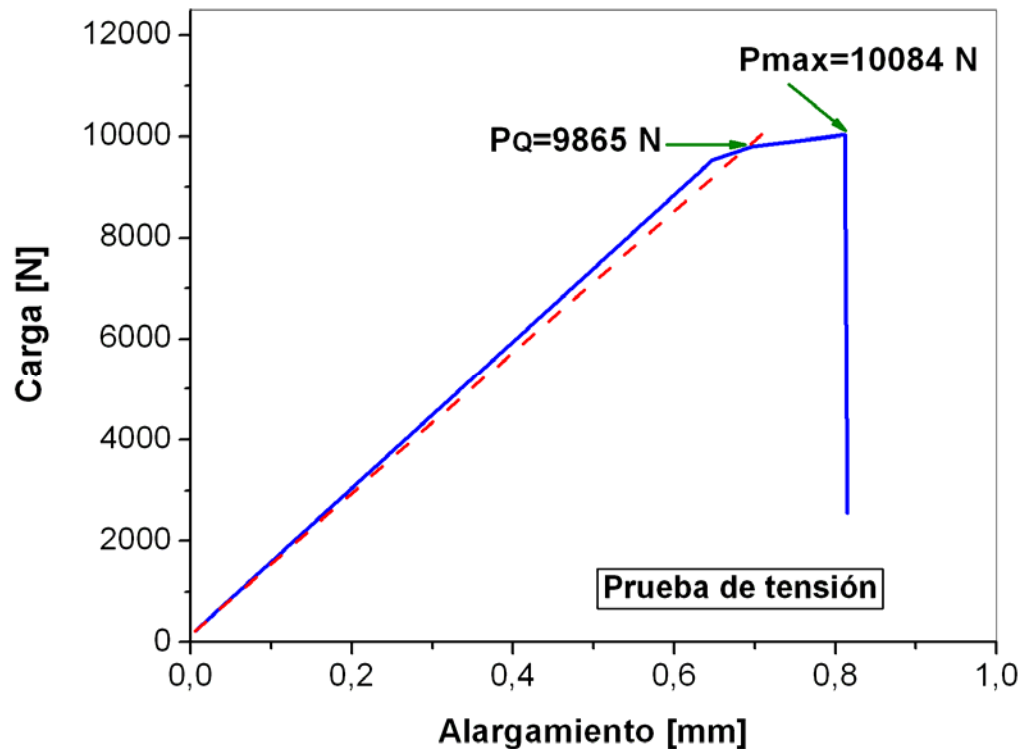
La tabla 5 presenta las condiciones usadas en el laboratorio y los resultados obtenidos para tres (3) probetas a tensión. Las columna 2, 3 y 4 de la tabla 5 presentan respectivamente la carga de prefisurado, el tiempo de prefisurado y el número de ciclos que se aplicaron a cada probeta. La columna 5 presenta la carga de fractura obtenida y la columna 6 muestra los valores de la carga  $P_Q$  calculados para cada probeta; la carga  $P_Q$  se obtiene de inclinar un 5% la pendiente de las curvas carga alargamiento y hallando la intersección con la curva original como se muestra en las figuras 19, 20 y 21.

Tabla 5. Datos del ensayo de prefisurado y de tracción

Probeta	Carga de prefisurado (N)	Tiempo de prefisurado (min)	Número de ciclos	Carga de fractura (N)	Carga calculada $P_Q$ (N)
1	3000	45	27000	10084	9865
2	3000	50	30000	10258	9463
3	3000	40	24000	10760	11337

#### 4.1.1. Resultados de las pruebas de la probeta 1 a tracción

Figura 19. Curva carga Vs alargamiento de la probeta 1 sometida a prueba de tracción.



La carga de fractura fue de **10084 N** inclinando la pendiente un 5% se halla la carga **P<sub>Q</sub> = 9865 N** la relación  $P_{max}/P_Q = 1.02$ , lo que indica que el ensayo es valido; se considera un ensayo valido cuando la relación  $P_{max}/P_Q \leq 1.1$ <sup>12</sup>.

Con el valor de la carga calculada **P<sub>Q</sub>** obtenido y los parámetros medidos experimentalmente como el espesor de la probeta **B**, Longitud de la probeta al centro del agujero **W**, Longitud desde el centro de los agujeros hasta la punta de la grieta **a**; se procede a calcular **K<sub>Q</sub>**

---

<sup>12</sup> Ibíd., p. 73.

$$K_Q = (P_Q / B * \sqrt{W}) * f(a/W) \quad (7)$$

Donde:

**P<sub>Q</sub>**= carga determinada por la grafica Carga vs. Alargamiento, expresada en KN.

**B** = Espesor de la probeta (cm.).

**W** = Longitud de la probeta al centro del agujero (cm.).

**a** = Longitud desde el centro de los agujeros hasta la punta de la grieta (cm.).

$$a/W = 11.4\text{mm}/21.7\text{mm} = 0.513$$

Para obtener el valor de  $f(a/W)$  se recurre a la tabla 6 que presenta la norma ASTM E399-90

Tabla 6. Relaciones entre  $a/w$  y  $f(a/w)$  probeta a tracción 1.

A4.5.3.1 To facilitate calculation of $K_Q$ , values of $f(a/W)$ are tabulated below for specific values of $a/W$ .			
Compact Specimens			
$a/W$	$f(a/W)$	$a/W$	$f(a/W)$
0.450	8.34	0.500	9.66
0.455	8.46	0.505	9.81
0.460	8.58	0.510	9.96
0.465	8.70	0.515	10.12
0.470	8.83	0.520	10.29
0.475	8.96	0.525	10.45
0.480	9.09	0.530	10.63
0.485	9.23	0.535	10.80
0.490	9.37	0.540	10.98
0.495	9.51	0.545	11.17
		0.550	11.36

Fuente: ASTM. Annual Book of ASTM Standard: E 399-90 “Estándar Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials”. Estados Unidos: ASTM, 1986. p. 16.

De donde se obtiene que para el valor de  $a/w$  igual a 0.513 corresponde un valor de  $f(a/w)$  de 9.96

$$K_Q = (P_Q / B * \sqrt{W}) * f(a/W) \quad (8)$$

$$K_Q = \left( \frac{9.865}{1.08 * \sqrt{2.17}} \right) * 9.96 \quad (9)$$

$$K_Q = 61.7 \text{ MPa}\sqrt{m}$$

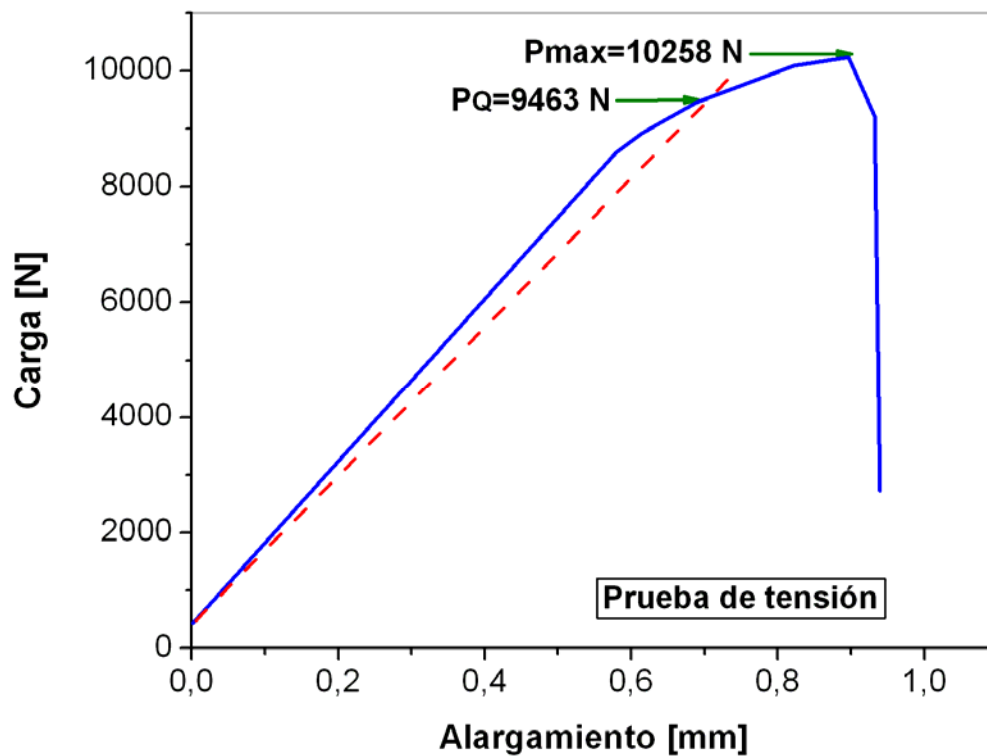
como previamente se comprobó por medio de la relación  $P_{\max}/P_Q$  que el ensayo es valido.

Se puede decir que  $K_Q = K_{IC}$

$$K_{IC} = 61.7 \text{ MPa}\sqrt{m}$$

#### 4.1.2. Resultados de las pruebas de la probeta 2 a tracción

Figura 20. Curva carga vs alargamiento de la probeta 2 sometida a prueba de tracción.



La carga de fractura fue de **10258 N** desplazando la pendiente un 5% se halla la carga  **$P_Q=9463\text{N}$**  la relación  $P_{\max}/P_Q = 1.08$  indica que el ensayo es valido (se considera un ensayo valido cuando la relación  $P_{\max}/P_Q \leq 1.1$  se cumpla).

$$a/W = 11.5\text{mm}/21.7\text{mm} = 0.53$$

Siguiendo el procedimiento anterior se recurre a la tabla 7 que presenta la norma ASTM E399-90

Tabla 7. Relaciones entre  $a/w$  y  $f(a/w)$  probeta a tracción 2.

A4.5.3.1 To facilitate calculation of $K_Q$ , values of $f(a/W)$ are tabulated below for specific values of $a/W$ .			
Compact Specimens			
$a/W$	$f(a/W)$	$a/W$	$f(a/W)$
0.450	8.34	0.500	9.66
0.455	8.46	0.505	9.81
0.460	8.58	0.510	9.96
0.465	8.70	0.515	10.12
0.470	8.83	0.520	10.29
0.475	8.96	0.525	10.45
0.480	9.09	0.530	10.63
0.485	9.23	0.535	10.80
0.490	9.37	0.540	10.98
0.495	9.51	0.545	11.17
		0.550	11.36

Fuente: ASTM. Annual Book of ASTM Standard: E 399-90 “Estándar Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials”. Estados Unidos: ASTM, 1986. p. 16.

De donde se obtiene que para el valor de  $a/w$  corresponde un valor de  $f(a/w)$  de 10.63

Se calcula  $K_Q$

$$K_Q = (P_Q / B * \sqrt{W}) * f(a/W) \quad (10)$$

$$K_Q = \left( \frac{9.463}{1.08 * \sqrt{2.17}} \right) * 10.63 \quad (11)$$

$$K_Q = 63.22 MPa\sqrt{m}$$

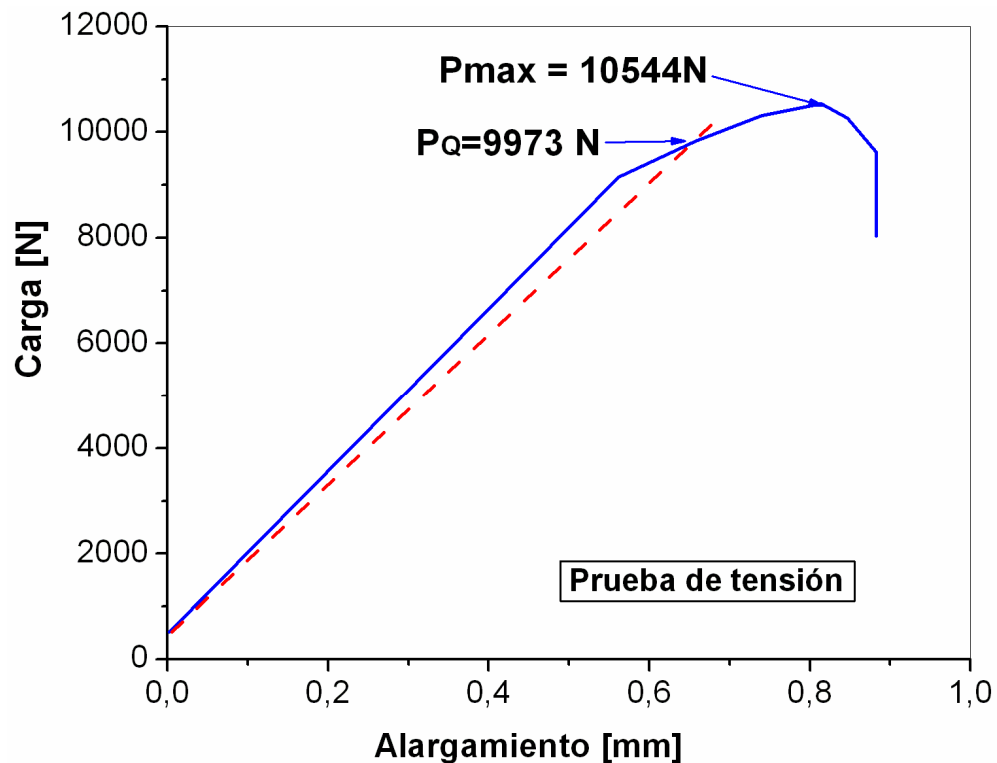
como previamente se comprobó por medio de la relación  $P_{max}/P_Q$  que el ensayo es valido.

Se puede decir que  $K_Q = K_{IC}$

$$K_{IC} = 63.22 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$$

#### 4.1.3. Resultados de las pruebas de la probeta 3 a tracción

Figura 21. Curva carga vs alargamiento de la probeta 3 sometida a prueba de tracción.



La carga de fractura fue de **10544 N** desplazando la pendiente un 5% se halla la carga **P<sub>Q</sub> = 9973 N** la relación  $P_{\text{max}}/P_Q = 1.05$  lo que indica que el ensayo es válido.

Se procede a calcular **K<sub>Q</sub>**:

$$K_Q = \left( P_Q / B * \sqrt{W} \right) * f(a/W) \quad (12)$$

$$a/W = 11.21/21.7 = 0.51$$

Se recurre a la tabla 8 que contiene las relaciones de acuerdo a la norma ASTM E 399-90.



Tabla 8. Relaciones entre  $a/w$  y  $f(a/w)$  probeta a tracción 3.

A4.5.3.1 To facilitate calculation of $K_Q$ , values of $f(a/W)$ are tabulated below for specific values of $a/W$ .			
Compact Specimens			
$a/W$	$f(a/W)$	$a/W$	$f(a/W)$
0.450	8.34	0.500	9.66
0.455	8.46	0.505	9.81
0.460	8.58	0.510	9.96
0.465	8.70	0.515	10.12
0.470	8.83	0.520	10.29
0.475	8.96	0.525	10.45
0.480	9.09	0.530	10.63
0.485	9.23	0.535	10.80
0.490	9.37	0.540	10.98
0.495	9.51	0.545	11.17
		0.550	11.36

Fuente: ASTM. Annual Book of ASTM Standard: E 399-90 “Estándar Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials”. Estados Unidos: ASTM, 1986. p. 16.

De donde se obtiene que para el valor de  $a/w$  corresponde un valor de  $f(a/w)$  de 9.96

Se calcula  $K_Q$ :

$$K_Q = \left( P_Q / B * \sqrt{W} \right) * f(a/W) \quad (13)$$

$$K_Q = \left( \frac{9.973}{1.08 * \sqrt{2.17}} \right) * 9.96 \quad (14)$$

$$K_Q = 62.4 MPa\sqrt{m}$$

como previamente se comprobó por medio de la relación  $P_{max}/P_Q$  que el ensayo es valido.

Se puede decir que  $K_Q = K_{IC}$

$$K_{IC} = 62.4 MPa\sqrt{m}$$

La tabla 9 presenta un resumen de los resultados de la tenacidad a la fractura  $K_{IC}$  por tensión obtenidos experimentalmente.

Tabla 9. Resultados experimentales de tenacidad a la fractura  $K_{IC}$  para las tres probetas.

Probeta	Tenacidad a la fractura $K_{IC}$ $MPa\sqrt{m}$
1	61.7
2	63.2
3	62.4

Promediando los tres resultados de tenacidad a la fractura  $K_{IC}$  de las probetas a tensión se tiene que el valor del acero AISI/SAE 1045 de producción nacional es de  $62.4 MPa\sqrt{m}$ . El valor obtenido experimentalmente es muy cercano al valor de tenacidad a la fractura obtenido por correlaciones de  $54.2 MPa\sqrt{m}$  y que se tomo como referencia (sección 4.3).

#### 4.2. CÁLCULOS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EXPERIMENTALMENTE PARA PROBETAS A FLEXIÓN

Las probetas a flexión se montan en el equipo como se puede ver en la figura 22, en el caso de estas probetas la carga para generar la grieta debe estar por debajo de la carga de prefisurado obtenida por la ecuación 15, suministrada por la norma ASTM 1290.

$$Pf = 0.5 * \left( \frac{Bb_0\sigma_y}{S} \right) \quad (15)$$

Donde:

**B** = Espesor de la probeta

**b<sub>0</sub>** = Ligamento de la probeta

**S** = Distancia entre los apoyos de la probeta.

$$\sigma_y = \left( \frac{S_{ut} + S_y}{2} \right) \quad (16)$$

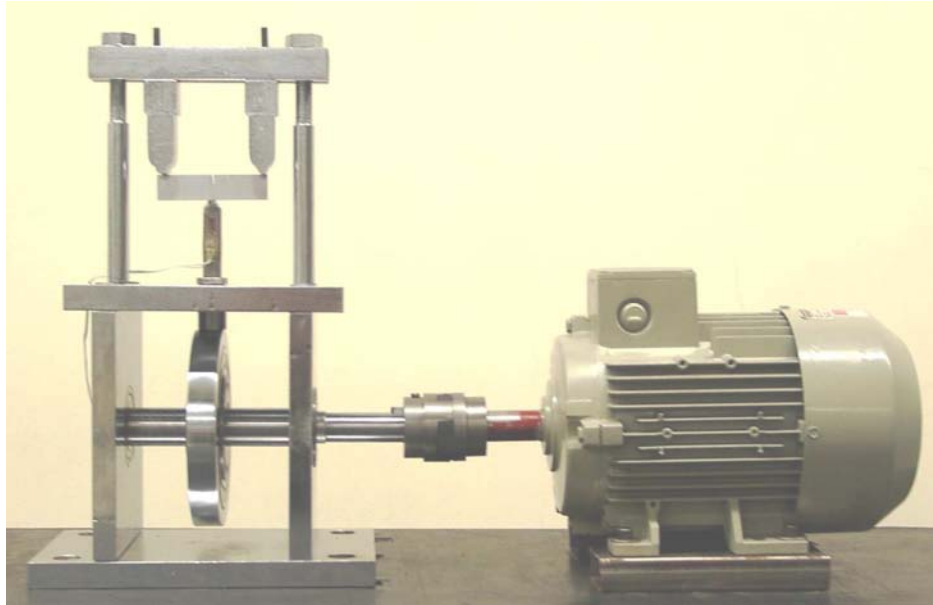
Donde:

**S<sub>ut</sub>**= Esfuerzo ultimo a tensión del material.

**S<sub>y</sub>** = Esfuerzo de fluencia del material.

$$Pf = 0.5 * \left( \frac{9.52 * (9.74)^2 * 543.9}{76.16} \right) = 3224N \quad (17)$$

Figura 22. Montaje del equipo generador de grieta para prueba a flexión.



Fuente: Archivo fotográfico grupo GCIM. Cali, 2004.

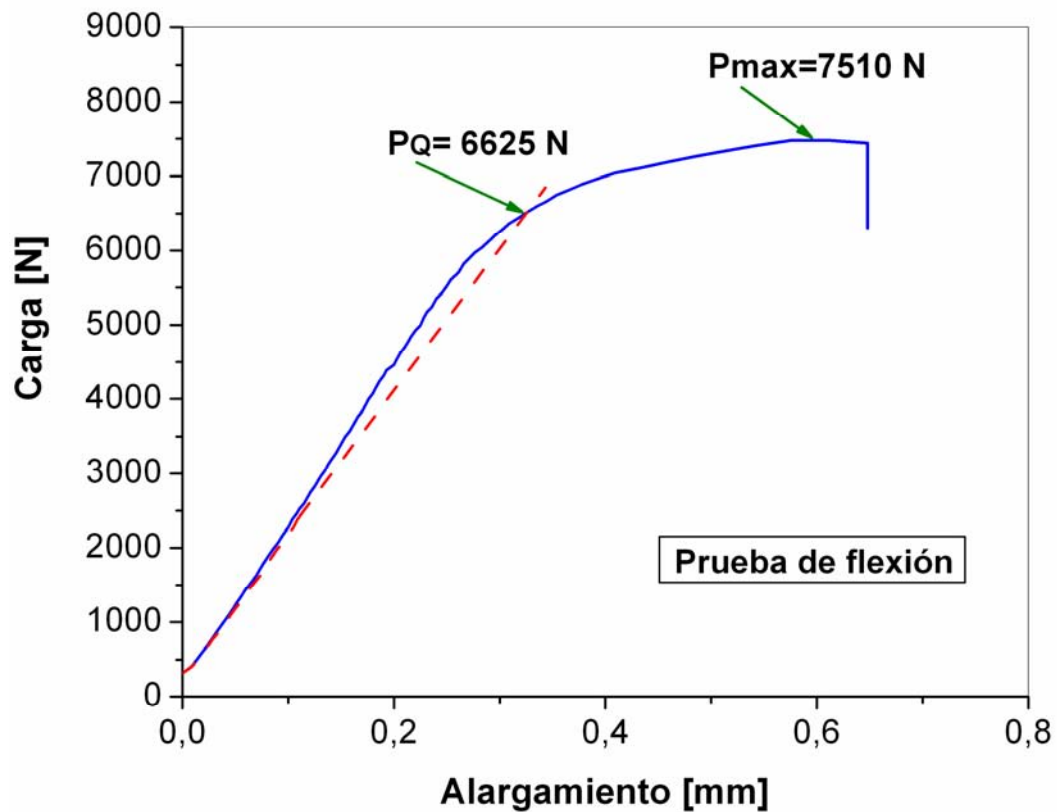
La carga aplicada en el generador de grieta por fatiga para el ensayo de la probeta a flexión debe ser menor que 3224 N se seleccionó una carga de 3000 N que es un valor de carga menor que la carga máxima calculada.

Tabla 10. Datos del ensayo de prefisurado y de flexión.

Probeta	Carga de prefisurado (N)	Tiempo de prefisurado (min)	Número de ciclos	Carga de rotura (N)	Carga calculada $P_Q$ (N)
1	3000	60	36000	7510	6625
2	3000	63	37800	3883	3214
3	3000	68	40800	7450	6590

#### 4.2.1. Resultados de las pruebas de la probeta 1 a flexión

Figura 23. Curva carga vs alargamiento de la probeta 1 sometida a prueba de flexión.



La carga de fractura fue de **7510 N** desplazando la pendiente un 5% se halla la carga **P<sub>Q</sub>= 6625 N** la relación  $P_{max}/P_Q = 1.1$  indica que el ensayo es valido; se considera un ensayo valido cuando la relación de  $P_{max}/P_Q \leq 1.1$ .

Donde:

$$a/W = 10\text{mm}/19\text{mm} = 0.526$$

Se recurre a la tabla 11 que presenta la norma ASTM E 399-90.

Tabla 11. Relaciones entre  $a/w$  y  $f(a/w)$  probeta a flexión 1.

To facilitate calculation of $K_Q$ , values of $f(a/W)$ are tabulated in the following table for specific values of $a/W$ .			
Bend Specimens			
$a/W$	$f(a/W)$	$a/W$	$f(a/W)$
0.450	2.29	0.500	2.66
0.455	2.32	0.505	2.70
0.460	2.35	0.510	2.75
0.465	2.39	0.515	2.79
0.470	2.43	0.520	2.84
0.475	2.46	0.525	2.89
0.480	2.50	0.530	2.94
0.485	2.54	0.535	2.99
0.490	2.58	0.540	3.04
0.495	2.62	0.545	3.09
		0.550	3.14

Fuente: ASTM. Annual Book of ASTM Standard: E 399-90 “Estándar Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials”. Estados Unidos: ASTM, 1986. p. 14.

$$K_Q = \left( \frac{P_Q S}{B(W)^{3/2}} \right) * f(a/W) \quad (18)$$

Donde:

**B** = Espesor de la probeta (cm)

**P<sub>Q</sub>** = Carga determinada por la grafica Carga vs. Alargamiento expresada en KN

**W** = Altura de la probeta (cm)

**S** = Distancia entre los apoyos de la probeta (cm)

$$K_Q = \left( \frac{6.625 * 7.66}{0.95 * (1.9)^{3/2}} \right) * 2.89 \quad (19)$$

$$K_Q = 59 \text{ MPa} \sqrt{m}$$

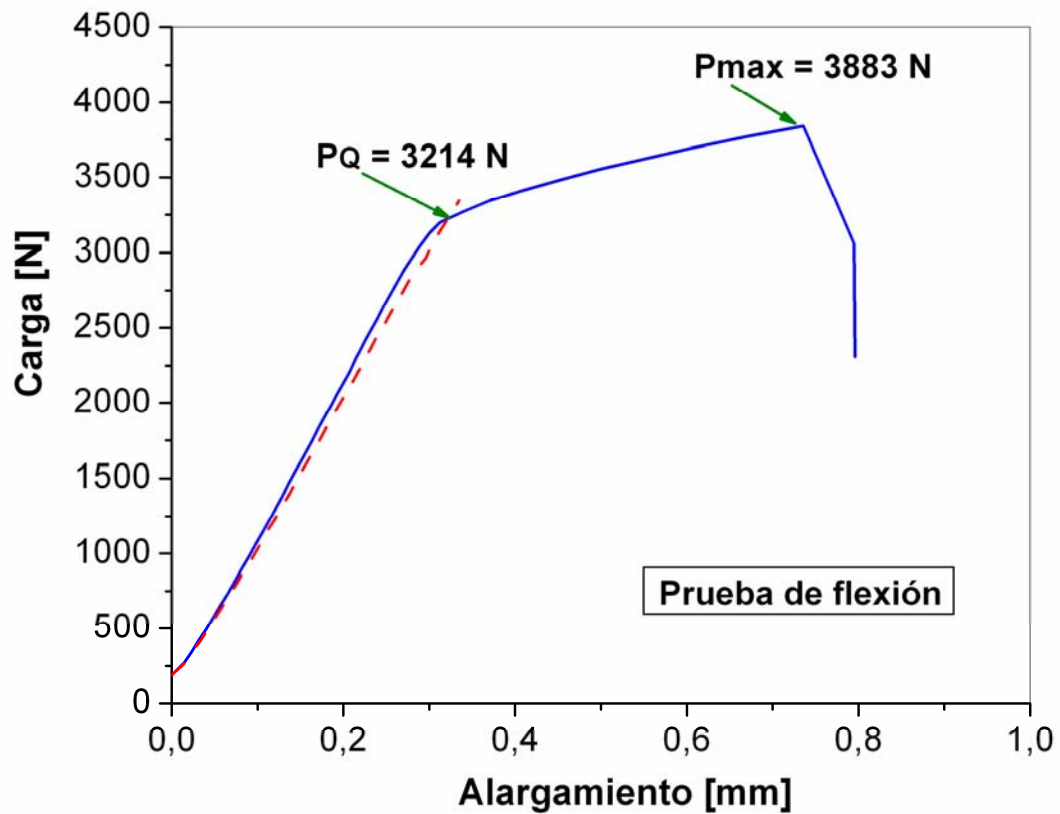
Ya que se comprobó por medio de la relación  $P_{max}/P_Q = 1.1$  que el ensayo es valido.

Se puede decir que  $K_Q = K_{IC}$

$$K_{IC} = 59 \text{ MPa}\sqrt{m}$$

#### 4.2.2. Resultados de las pruebas de la probeta 2 a flexión

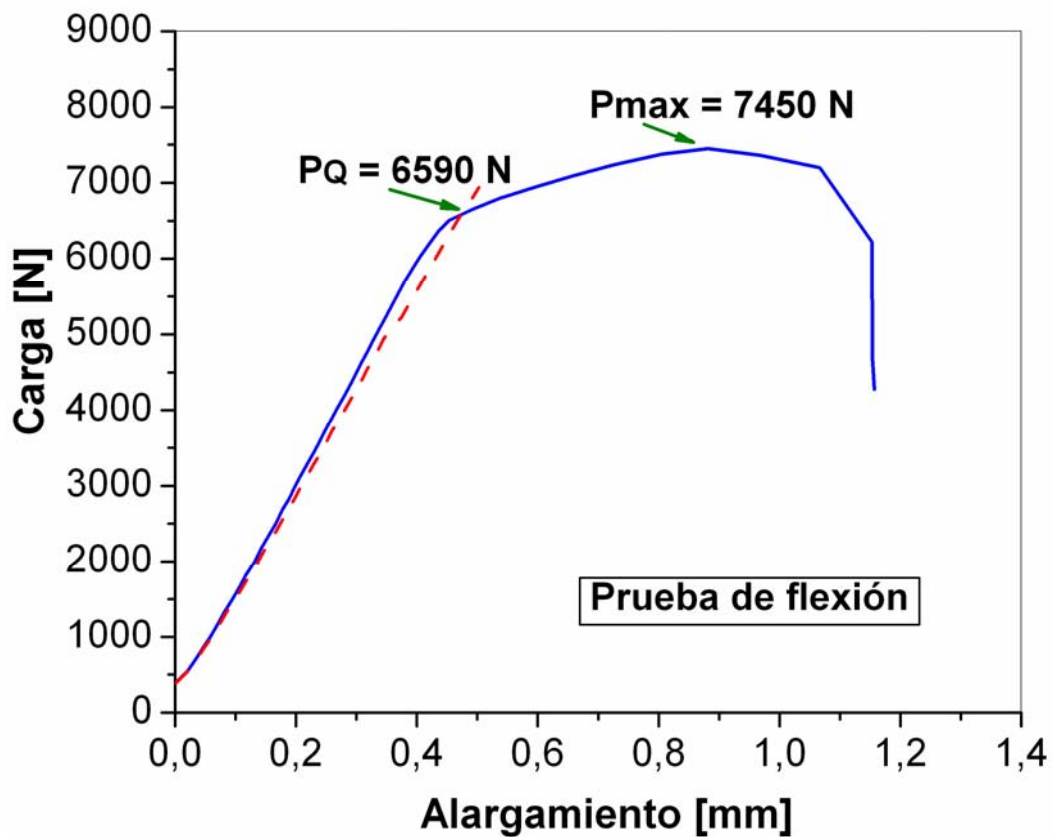
Figura 24. Curva carga vs alargamiento de la probeta 2 sometida a prueba de flexión.



La carga de fractura fue de **3883 N** desplazando la pendiente un 5% se halla la carga  **$P_Q = 3214 \text{ N}$**  la relación  $P_{max}/P_Q = 1.2$  indica que el ensayo no es valido.

#### 4.2.3. Resultados de las pruebas de la probeta 3 a flexión

Figura 25. Curva carga vs alargamiento de la probeta 3 sometida a prueba de flexión.



La carga de fractura fue de **7450 N** desplazando la pendiente un 5% se halla la carga  **$P_Q = 6590 \text{ N}$**  la relación  $P_{\max}/P_Q = 1.1$  indica que el ensayo es válido.

Donde:

$$a/W = 10.1 \text{ mm}/19\text{mm} = 0.533$$

Se recurre a la tabla 12 que presenta la norma ASTM E 399-90.

Tabla 12. Relaciones entre  $a/w$  y  $f(a/w)$  probeta a flexión 3.

To facilitate calculation of $K_Q$ , values of $f(a/W)$ are tabulated in the following table for specific values of $a/W$ .			
Bend Specimens			
$a/W$	$f(a/W)$	$a/W$	$f(a/W)$
0.450	2.29	0.500	2.66
0.455	2.32	0.505	2.70
0.460	2.35	0.510	2.75
0.465	2.39	0.515	2.79
0.470	2.43	0.520	2.84
0.475	2.46	0.525	2.89
0.480	2.50	0.530	2.94
0.485	2.54	0.535	2.99
0.490	2.58	0.540	3.04
0.495	2.62	0.545	3.09
		0.550	3.14

Fuente: ASTM. Annual Book of ASTM Standard: E 399-90 “Estándar Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials”. Estados Unidos: ASTM, 1986. p. 14.

$$K_Q = \left( \frac{P_Q S}{B(W)^{3/2}} \right) * f(a/W) \quad (20)$$

Donde:

**B** = Espesor de la probeta (cm)

**P<sub>Q</sub>** = Carga determinada por la grafica Carga vs. Alargamiento expresada en KN

**W** = Altura de la probeta (cm)

**S** = Distancia entre los apoyos de la probeta (cm)

$$K_Q = \left( \frac{6.590 * 7.66}{0.95 * (1.9)^{3/2}} \right) * 2.99 \quad (21)$$

$$K_Q = 60.6 MPa\sqrt{m}$$

Ya que se comprobó por medio de la relación  $P_{max}/P_Q = 1.1$  que el ensayo es valido.



Se puede decir que  $K_Q = K_{IC}$

$$K_{IC} = 60.6 \text{ MPa}\sqrt{m}$$

En las probeta 1 y 3 a flexión se encontró un valor de tenacidad a la fractura  $K_{IC}$  del acero AISI/SAE 1045 de producción nacional de  $59 \text{ MPa}\sqrt{m}$  y  $60.6 \text{ MPa}\sqrt{m}$  respectivamente. El valor obtenido experimentalmente es muy cercano al valor de tenacidad a la fractura obtenido por correlaciones de  $54.2 \text{ MPa}\sqrt{m}$  y que se tomo como referencia (sección 4.3 ).

En cuanto al resultado no valido obtenido en la probeta a flexión 2 esto se debe probablemente a defectos internos en el material, o a un mal proceso de fabricación de la probeta, en el cual se crearon irregularidades que provocaron que su comportamiento no fuera el esperado.

#### 4.3. CALCULO DEL VALOR DE TENACIDAD A LA FRACTURA $K_{IC}$ OBTENIDO POR CORRELACIONES

Para tener un valor de referencia con el cual comparar los resultados experimentales obtenidos al hallar la tenacidad a la fractura  $K_{IC}$  mediante el método de crecimiento de grieta por fatiga; se hallo el valor de la tenacidad a la fractura  $K_{IC}$  por el método de correlaciones, utilizando la ecuación establecida por Rolfe, Novak y Barsom<sup>13</sup> y los datos obtenidos del ensayo de impacto Charpy realizado a tres probetas de acero 1045.

$$\left( \frac{K_{IC}}{\sigma_y} \right)^2 = 0.646 \frac{CVN}{\sigma_y} - 6.35 \times 10^{-3} \quad (22)$$

Donde:

**CVN** = Energía de impacto charpy (Julios).

**$K_{IC}$**  = Tenacidad a la fractura ( $\text{MPa}\sqrt{m}$ ).

**$\sigma_y$**  = Esfuerzo de fluencia (MPa).

Donde  $\sigma_y$  es el limite elástico convencional al 0.2% medido a la misma temperatura y velocidad de carga que en el ensayo a la fractura<sup>14</sup> y **b** es el espesor de la probeta.

---

<sup>13</sup> GONZALES, Op. cit., Cap 6. p. 8.

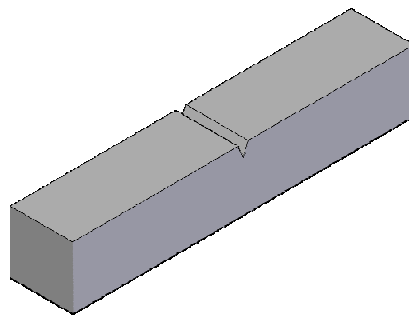
<sup>14</sup> Ibíd., Cap 6. p. 6-10.

En las figuras 26 se presenta una fotografía de la máquina para ensayos Charpy que fue utilizada para realizar las pruebas de impacto y en la figura 27 se muestra un esquema de la probeta utilizada para la prueba de impacto.

Figura 26. Máquina de ensayo Charpy.



Figura 27. Probeta para ensayo charpy.



Mediante los datos obtenidos en las pruebas de impacto para cada una de las tres probetas de acero AISI/SAE 1045 se calculó el valor promedio de la energía de impacto Charpy **CVN**.

Energía de impacto obtenida para cada probeta:

Prueba 1 = 1.50 Kg.m

Prueba 2 = 1.60 Kg.m

Prueba 3 = 1.50 Kg.m

Se calculó el promedio de la energía de impacto obtenida en las probetas

$$\frac{1.5+1.6+1.5}{3} = 1.53 \text{ Kg.m} \quad (23)$$

1 kgm = 9.8 Julios

$$1.53 \text{ kgm} \times \frac{9.81 \text{ j}}{1 \text{ kgm}} = 15 \text{ Julios} \quad (24)$$

Se convirtió este valor en N.m para aplicarlo en la correlación establecida por Rolfe, Novak y Barsom<sup>15</sup>.

$$15 \text{ J} \times \frac{1 \text{ N.m}}{1 \text{ J}} = 15 \text{ N.m} = \text{CVN} \quad (25)$$

Se utilizó el valor conocido de la literatura del esfuerzo de fluencia para el acero AISI/SAE 1045 nacional  $\sigma_{ys} = 413.8 \text{ MPa}$  y el valor obtenido CVN del ensayo Charpy.

$$K_{IC} = \sigma_y \sqrt{0.646 \frac{\text{CVN}}{\sigma_y} - 6.35 \times 10^{-3}} \quad (26)$$

$$K_{IC} = 413.8 \sqrt{0.646 \frac{15}{413.8} - 6.35 \times 10^{-3}} = 54.2 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}} \quad (27)$$

---

<sup>15</sup> Ibíd., Cap 6. p. 8.

Este valor  $54.2 \text{ MPa}\sqrt{m}$  se utiliza como referencia para el valor de la tenacidad a la fractura  $K_{Ic}$  experimental

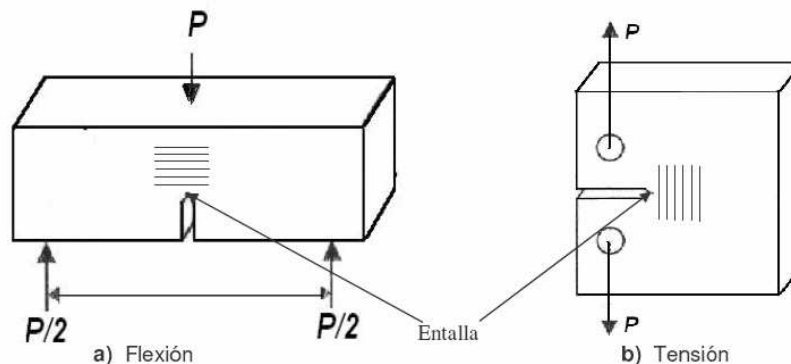
## 5. PRÁCTICA DE LABORATORIO CRECIMIENTO DE GRIETA POR FATIGA

Adicional al trabajo de investigación se diseñó una práctica de laboratorio sobre Tenacidad a la Fractura que se ofrecerá a estudiantes de Ingeniería y que permitirá utilizar el equipo generador de grieta por fatiga en el área de la docencia. Se diseñó una guía de laboratorio para la realización de la práctica; esta guía se muestra en el anexo 1 a este documento.

Teniendo en cuenta que es necesario controlar el crecimiento de una grieta por inspección visual; se realizaron varios ensayos de propagación de grieta en probetas a flexión y tensión; y se determinaron las curvas de crecimiento de grieta vs. tiempo, a partir de estas curvas se obtuvo la ecuación que más se ajusta al funcionamiento del equipo para tener mayor control del mismo para futuros ensayos; el procedimiento seguido en esta practica se detalla en la guía de laboratorio, adjunta a este documento en el anexo 1.

El procedimiento experimental consistió en aplicar una carga inferior a la carga de prefisurado; menor que 3000N, y trabajando con diferentes valores para las revoluciones por minuto, se intentó crecer una grieta de seis milímetros con avance en intervalos de un milímetro y registrar el tiempo en que esto ocurría; para esto inicialmente se hicieron marcas a partir del vértice de la entalla como se muestra en la figura 28. A medida que se realizaba el ensayo se observaban las probetas con una lupa y se cronometraba el tiempo.

Figura 28. Probetas marcadas para el experimento de crecimiento de grieta.



Los datos obtenidos de cada probeta durante el experimento de crecimiento de grieta por fatiga, se graficaron con el software Originlab\*; también se halló la

\* para la representación de los datos obtenidos, se utilizó el software OriginLab versión 7.0300; que se encuentra en Internet en la dirección <http://www.originlab.com>.

ecuación que mejor describe cada curva; haciendo uso de la opción ajustar polinomio a la curva, del software originlab; este tratamiento se hizo para probetas a tensión y a flexión.

### 5.1. CRECIMIENTO DE GRIETA EN PROBETAS A FLEXION

Tabla 13. Resultados de pruebas de agrietamiento para probetas a flexión.

Probetas	Intervalo de crecimiento de grieta (mm) y tiempo (min)						Fuerza (N)	Revoluciones por minuto
	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm	6mm		
1	0,20	1,24	1,55	3,15	10,12	20	1500	500
2	4,56	5,40	6,41	8,16	10,54	14,44	1500	500
3	2,10	3,30	4,54	5,51	6,23	8,10	2500	600
4	3,42	4,20	7	9,54	10,56	16,55	2500	600

Figura 29. Curva crecimiento de grieta vs. tiempo probeta 1 y 2 a flexión.

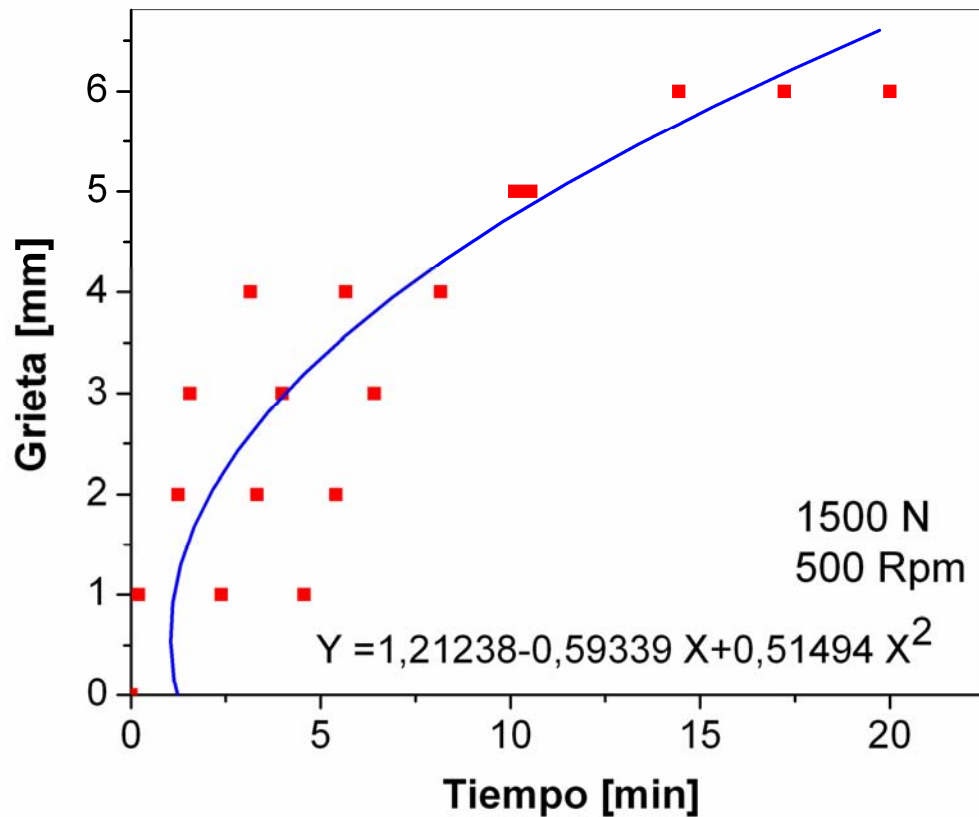
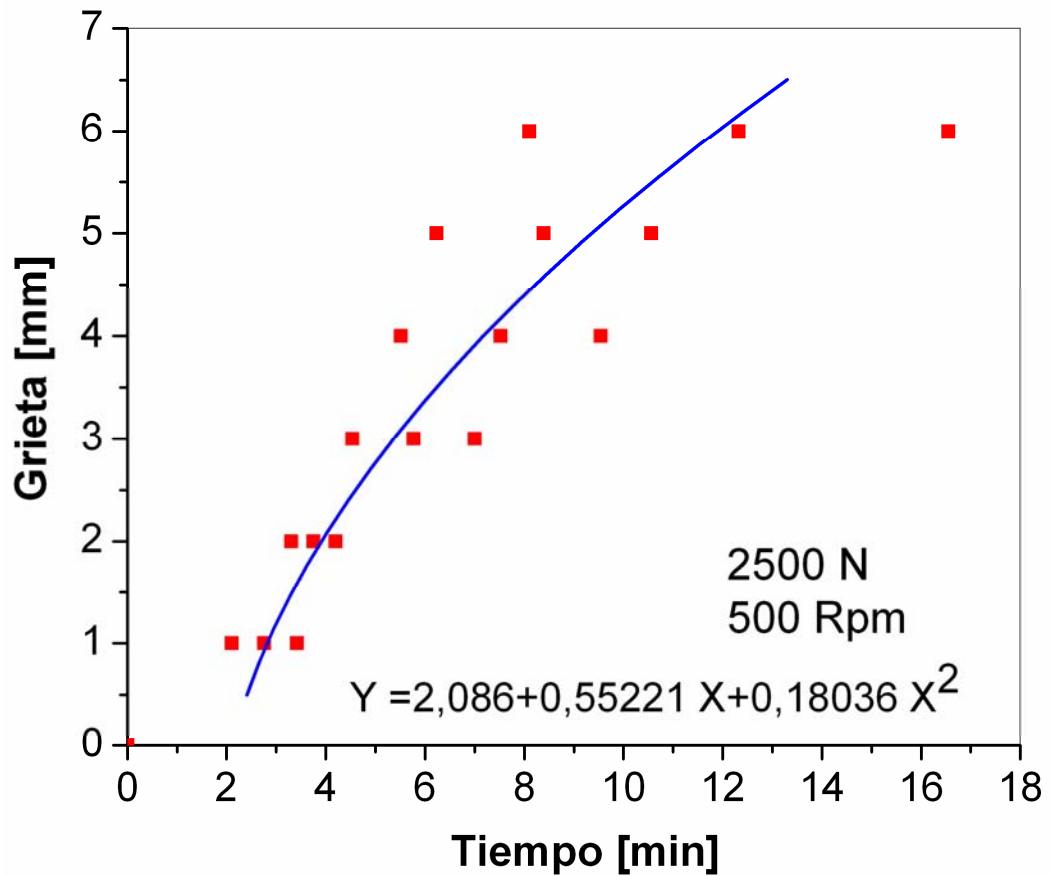


Figura 30. Curva crecimiento de grieta vs. tiempo probeta 3 y 4 a flexión.



De las curvas obtenidas al graficar los datos recopilados en los ensayos de crecimiento de grieta vs. tiempo en probetas a flexión, y que se presentan en las figuras 29 y 30; se obtuvieron las ecuaciones que más se ajustaron a estas curvas, estas ecuaciones pueden ser utilizadas para determinar el tiempo que toma el crecer una grieta de determinado tamaño; dato que es de utilidad para futuros ensayos.

## 5.2. CRECIMIENTO DE GRIETA EN PROBETAS A TENSION

Tabla 14 Resultados de pruebas de agrietamiento para probetas compactas

Probetas	Intervalo de crecimiento de grieta (mm) y tiempo (min)						Fuerza (N)	Revoluciones por minuto
	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm	6mm		
1	8	15	15,51	16,20	17,7	18,32	1415	500
2	27	28,32	31	47,17	49	54	1415	500
3	6	21	24	25	34	36	2950	500
4	6	15	16,40	20	23,11	24,23	2950	500

Figura 31. Curva crecimiento de grieta vs. tiempo probeta 1 y 2 a tensión.

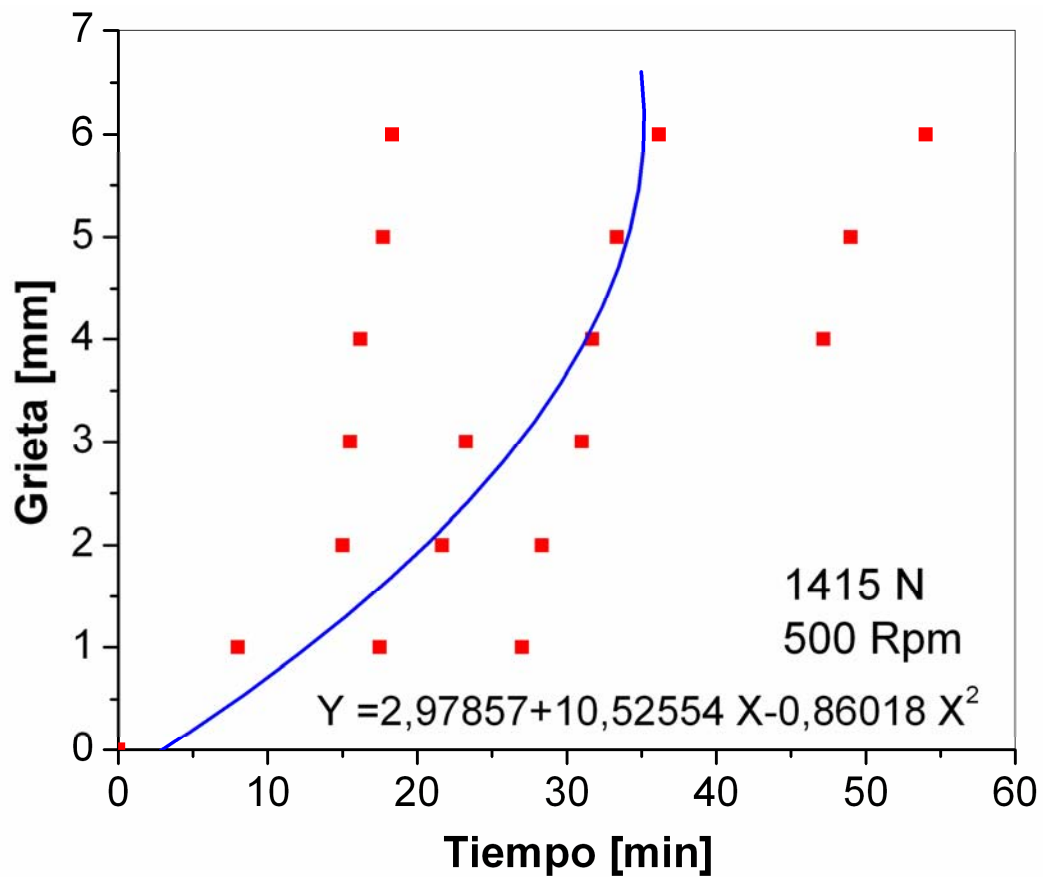
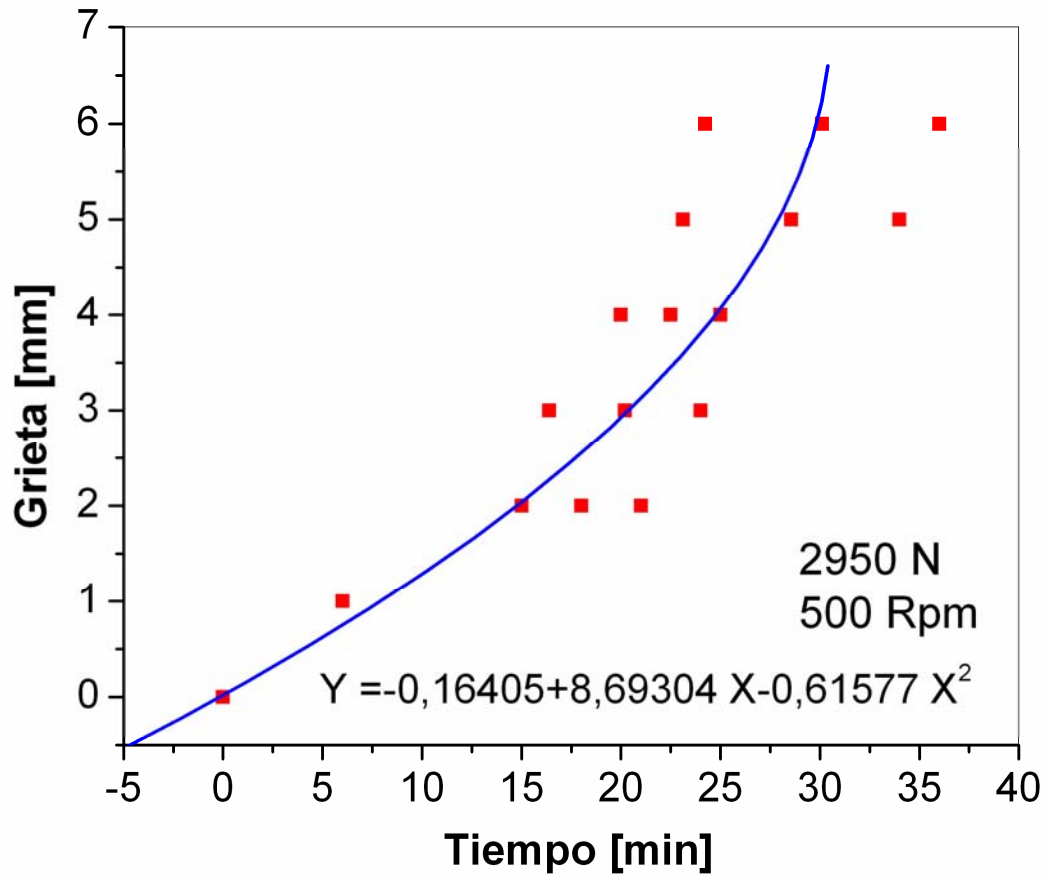




Figura 32. Curva crecimiento de grieta vs. tiempo probeta 3 y 4 a tensión.



De las curvas obtenidas al graficar los datos recopilados en los ensayos de crecimiento de grieta vs. tiempo en probetas a tensión, y que se presentan en las figuras 31 y 32; se obtuvieron las ecuaciones que más se ajustaron a estas curvas, estas ecuaciones pueden ser utilizadas para determinar el tiempo que toma el crecer una grieta de determinado tamaño; dato que es de utilidad para futuros ensayos.

## 6. CONCLUSIONES

- Para el acero AISI/SAE 1045 se determinó la tenacidad a la fractura  $K_{IC}$  utilizando la técnica de generación de grieta por fatiga y por correlación mediante el ensayo de impacto charpy, se encontró que los valores fueron muy cercanos por lo que se confirma que el valor de la tenacidad a la fractura obtenido es confiable.
- Se comprobó que el equipo generador de grieta por fatiga, diseñado por el grupo GCIM, es confiable para utilizarlo en ensayos de tenacidad a la fractura en probetas estandarizadas para materiales metálicos.
- Se comprobó que en el equipo generador de grieta por fatiga, es posible crecer grietas en probetas para materiales metálicos que cumplan con las condiciones necesarias para lograr ensayos de mecánica de la fractura exitosos
- Con este equipo es posible prestar el servicio de análisis de tenacidad a la fractura a la industria, a un bajo costo.

## **7. PERSPECTIVAS**

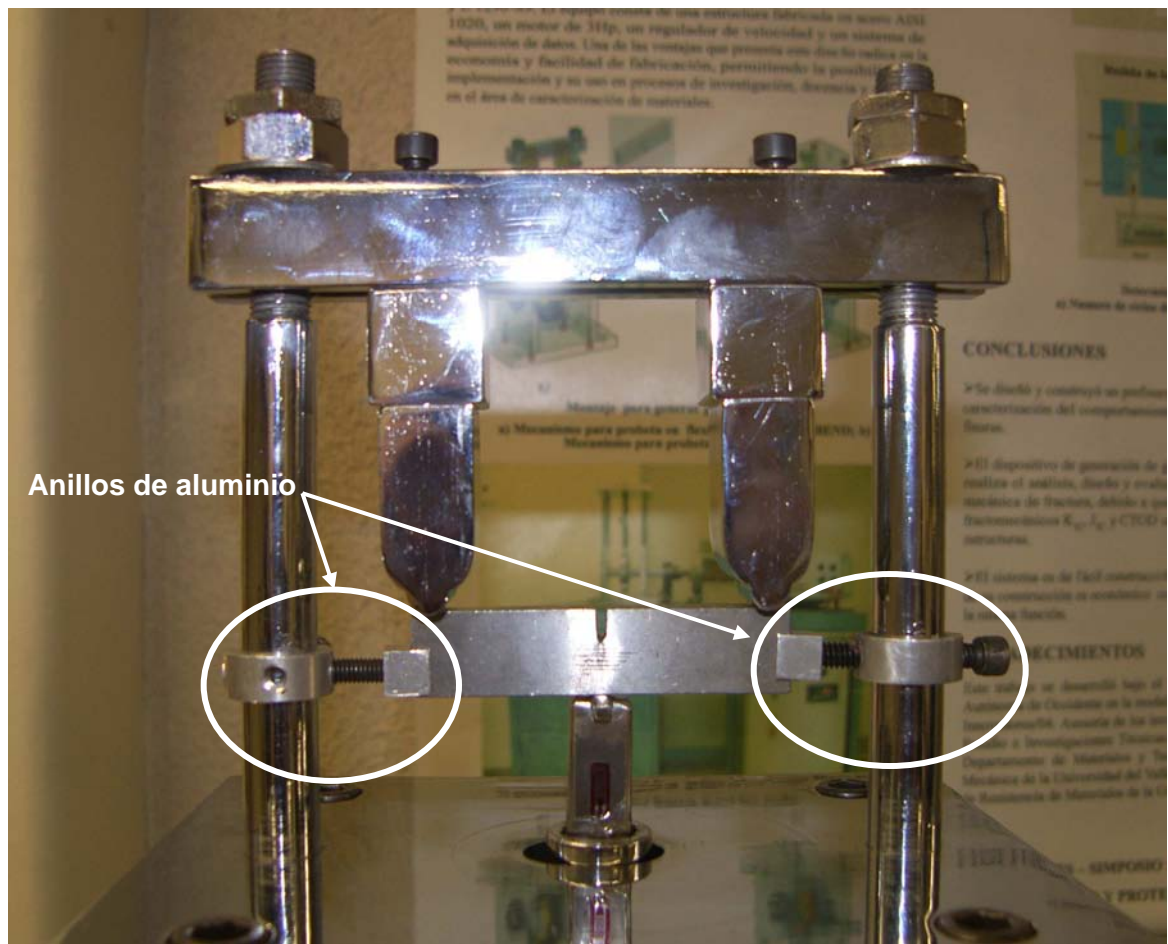
Se recomienda continuar con la investigación para obtener los valores de la tenacidad a la fractura del acero AISI/SAE1045 de producción nacional, sometido a diferentes tratamientos térmicos; y comparar estos valores con los resultados de tenacidad a la fractura obtenidos en esta investigación.

Teniendo en cuenta con el equipo Generador de Grieta por Fatiga se obtuvieron valores confiables es posible continuar con la investigación de determinar la tenacidad a la fractura en otros tipos de aceros.

## 8. RECOMENDACIONES

Se recomienda cambiar los anillos de aluminio, que se presentan en la figura 33 y que sirven de soporte a las probetas a flexión, por otros de acero ya que los de aluminio, se desgastan muy rápidamente debido a la fuerza que se requiere aplicarles para que se ajusten a las barras de soporte principal.

Figura 33. Porta probetas a flexión, equipo generador de grieta por fatiga.



Se sugiere en un futuro registrar los datos de fuerza y tiempo del ensayo directamente en un computador por medio de una tarjeta de adquisición de datos, para poder llevar un control más exacto del ensayo.

## BIBLIOGRAFIA

ANGLADA, MJ.; LLANE, L.M.; MATEO, MN. Fractura de materiales. Barcelona España: Edicion Universidad Politécnica de Cataluña, 2002. 230 p.

ASTM. Annual Book of ASTM Standard: E 399-90 "Estándar Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials". Estados Unidos: ASTM, 1986. 31 p.

CAÑIZALES, Juan Pablo; TORO, Álvaro José; JARAMILLO SUÁREZ, Héctor Enrique; ALBA DE SÁNCHEZ, Nelly Cecilia. Introducción a la Mecánica de la Fractura y Análisis de Fallas. Cali: Universidad Autónoma de Occidente, 2006. 266 p.

GONZÁLES, J. Mecánica de la fractura bases y aplicaciones. México: Noriega editores S.A., 2000. 150 p.

GONZÁLES, J. L. Mecánica de fractura. 2 ed. Mexico: Noriega editores S.A., 2004. 188 p.

HERNÁNDEZ A, Héctor; ESPEJO M, Edgar. Mecánica de fractura y análisis de falla. Bogotá: Universidad Nacional, 2002. 373 p.

HINESTROZA GONZÁLEZ, Oscar Andrés. Diseño y construcción de un banco prefisurador de probetas tipo flexión en tres puntos para determinar la tenacidad del acero SAE 1045. Santiago de Cali 2004. 93 p. Trabajo de grado ( Ingeniero Mecánico). Universidad del Valle.

MEIZOSO, Antonio Martin; MARTINEZ, Jose Manuel. Mecánica de la Fractura. España: ©Los autores, 1999. 170 p.

Mecánica de la fractura [en línea]. Medellín: Universidad Pontificia Bolivariana, 2006. [consultado junio 19 de 2007]. Disponible en Internet: [http://amasd.upb.edu.co/pregrado/diseno/diseno\\_C11\\_MecanicaFracturas.pdf](http://amasd.upb.edu.co/pregrado/diseno/diseno_C11_MecanicaFracturas.pdf).

SIDELPA S.A.. Catalogo Aceros Especiales. Cali: Editora Nicholl's Publicidad, 1990. 82 p.

VEDIA, L. A. Mecánica de Fractura. Argentina: publicación del proyecto multinacional de metalurgia OEA-CNEA, 1986. 171 p.

## Anexo 1. Guía de laboratorio determinación de la tenacidad a la fractura $K_{Ic}$ en aceros mediante crecimiento de grieta por fatiga.

Juan Pablo León – estudiante de ingeniería mecánica.  
Armando Bacca Robayo I M Investigador  
Héctor Enrique Jaramillo, MSc. Director Programa de Ingeniería Mecánica.  
Nelly Cecilia Alba de Sánchez, PhD. Docente Dpto. Ciencias Básicas de Ingeniería.

### GUÍA DE LABORATORIO

### DETERMINACIÓN DE LA TENACIDAD A LA FRACTURA $K_{Ic}$ EN ACEROS MEDIANTE CRECIMIENTO DE GRIETA POR FATIGA

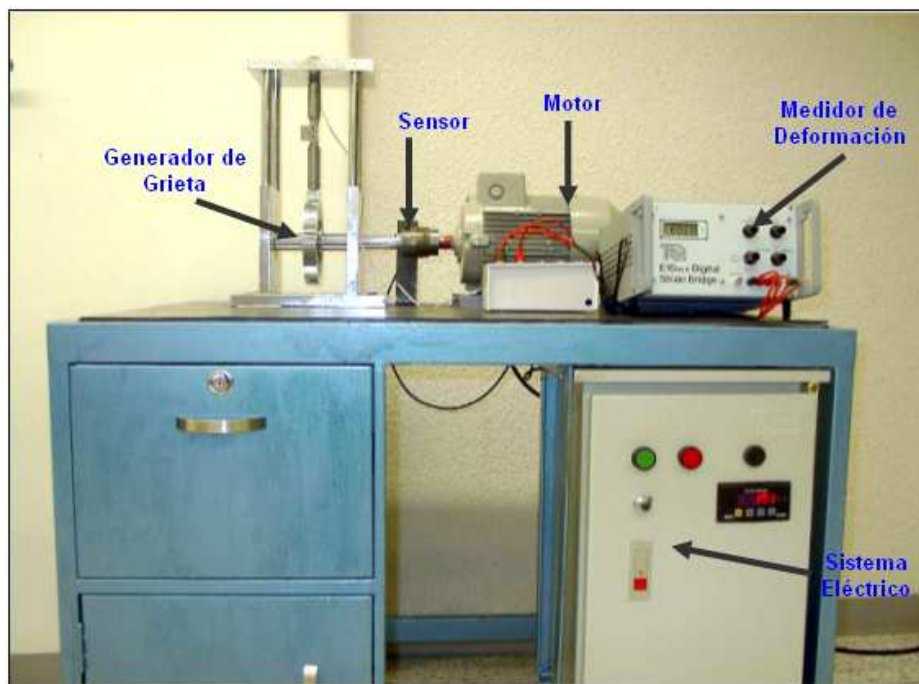


Figura 1. Equipo del laboratorio GCIM, Generador De Grieta Por Fatiga



## **1. OBJETIVOS**

### **1.1 OBJETIVO GENERAL**

Realizar ensayos que permitan determinar la tenacidad a la fractura para diversos aceros utilizando el método de generación de grieta por fatiga, y siguiendo las normas ASTM E399-90 y ASTM E1290-89.

### **1.2 Objetivos Específicos**

**1.2.1** Determinar el comportamiento de la grieta generada en probetas tipo tensión o compacta C(T) y flexión o Bend, con respecto al tiempo para diferentes clases de aceros.

**1.2.2** Familiarizar a los estudiantes con la operación del equipo generador de grieta por fatiga y con los procedimientos experimentales para la aplicación de las normas ASTM E399-90 y E1290-89.

## **2. MATERIALES Y EQUIPOS**

- Equipo generador de grieta por fatiga
- Maquina universal de ensayos UTS con dispositivos para tracción y flexión.
- Equipos medidores de deformación E10 y E18.
- Probetas tipo flexión y compacta.
- Cronometro.
- Calibrador.
- Llave de expansión de 10" y 15".
- Llaves boca fija de 13 mm y 1pulg.
- Llave allen de 10 mm.
- Lupa.
- Extensión eléctrica de 110v.
- Cautín.
- Soldadura de Estaño.
- Tintas penetrantes o equipo de partículas magnéticas.



### **3. ACTIVIDADES**

- Realizar las graficas crecimiento de grieta vs. tiempo.
- Obtener la ecuación de la grafica grieta vs. tiempo.
- Determinar el factor de la tenacidad a la fractura  $K_{IC}$  para el acero especificado por el profesor.
- Presentar un informe con los resultados obtenidos.

### **4. PROCEDIMIENTO**

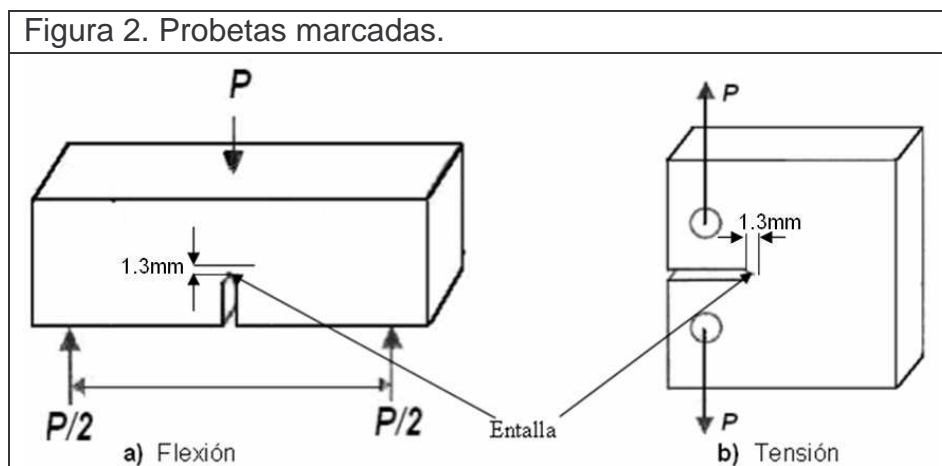
- Configurar el equipo para trabajar con la clase de probeta que se va a utilizar, a flexión o tracción.
- Realizar el montaje de la probeta en el equipo.
- Determinar y aplicar la carga máxima de prefisurado para generar la grieta por fatiga.
- Generar una grieta como mínimo de 1.3mm de largo, a partir del vértice de la entalla.
- Montar la probeta en la maquina universal de ensayos y aplicar cargas a tensión o a flexión según sea el caso, hasta llevar las probetas a su punto de fractura.
- Analizar los datos obtenidos carga vs desplazamiento, y obtener el valor de tenacidad a la fractura  $K_{IC}$ .

Para obtener los valores de tenacidad a la fractura en materiales metálicos, por el método de generación de grieta por fatiga, la Sociedad Americana de prueba de materiales (American Society for Testing Materials) ASTM ha establecido ensayos normalizados que garanticen resultados confiables; estos ensayos se basan en las normas ASTM E399-90 y E1290-89; En el laboratorio de Ciencia e Ingeniería de Materiales de la Universidad Autónoma de Occidente se cuenta con un equipo generador de grieta por fatiga especialmente diseñado y construido para operar bajo estas normas. Este equipo cuenta con un mecanismo de doble excéntrica que genera un perfil de carga sinusoidal, que simula las condiciones de fatiga a las que puede estar sometida un elemento mecánico.



## 4.1 PROBETAS

Las probetas que se utilizarán para determinar la tenacidad a la fractura por el método de crecimiento de grieta por fatiga son las establecidas por la norma ASTM E399-90, y que se observan en la figura 2; la misma norma establece que se debe generar una grieta como mínimo de 1.3 mm a partir de la entalla, por lo que es necesario realizar marcas en la probetas como las que se muestran en la figura 2; ya que el método para controlar el crecimiento de grieta es por inspección visual.



## 4.2 MONTAJE DE LAS PROBETAS

En las figuras 3 y 4 se puede observar el montaje de las probetas a flexión y a tensión respectivamente. En el caso de la probeta a tensión esta se sujeta a los aplicadores de carga por medio de pasadores que atraviesan sus agujeros. En el caso de la probeta a flexión esta cuenta con dos soportes laterales que cumplen la función de permitir que la probeta se mueva en sentido vertical pero que no se desplace en sentido horizontal.

Figura 3. Montaje probeta a tensión.

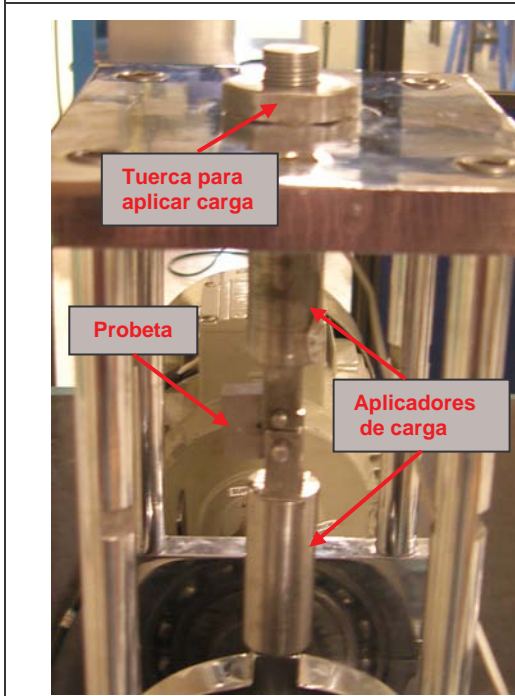
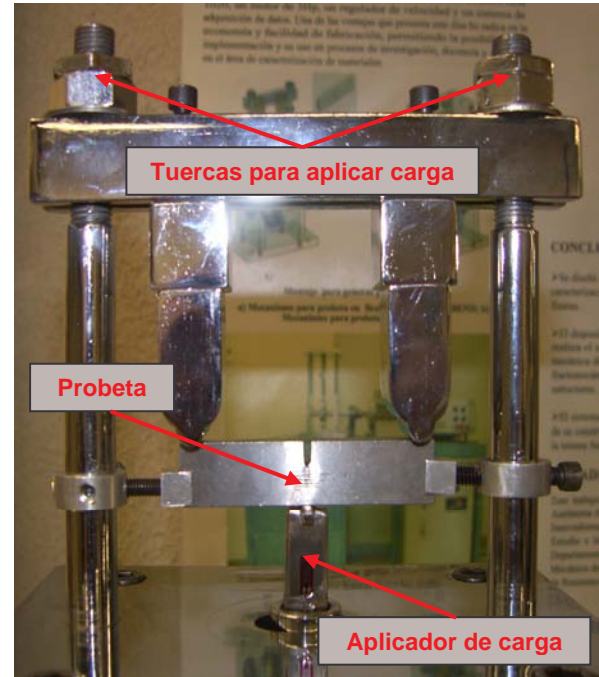


Figura 4. Montaje probeta a flexión.



### 4.3 CARGA MAXIMA DE PREFISURADO

La norma ASTM 1290 establece la carga máxima que se puede aplicar a las probetas durante el proceso de generación de grieta; esta carga se establece por medio de la ecuación (1) para el caso a tensión y de la ecuación (3) para el caso a flexión. En general se trabaja con una carga de prefisurado menor a la carga máxima calculada con el fin de evitar deformaciones plásticas en la probeta.

#### 4.3.1 Calculo de la carga máxima de prefisurado para probetas a tensión

$$P_f = 0.4 * \left( \frac{Bb_0^2 \sigma_y}{2W + a_0} \right) \quad (1)$$

Donde:

**P<sub>f</sub>** = Carga de prefisurado  
**a<sub>0</sub>** = Tamaño de grieta inicial  
**B** = Espesor de la probeta  
**b<sub>0</sub>** = Ligamento de la probeta

**W** = Ancho de la probeta

$$\sigma_y = \left( \frac{S_{ut} + S_y}{2} \right) \quad (2)$$

#### 4.3.1 Calculo de la carga máxima de prefisurado para probetas a flexión

$$P_f = 0.5 * \left( \frac{B b_0 \sigma_y}{S} \right) \quad (3)$$

Donde:

**B** = Espesor de la probeta

**b<sub>0</sub>** = Ligamento (distancia desde el vértice de la entalla al borde de la probeta)

**W** = Altura de la probeta

$$\sigma_y = \left( \frac{S_{ut} + S_y}{2} \right) \quad (4)$$

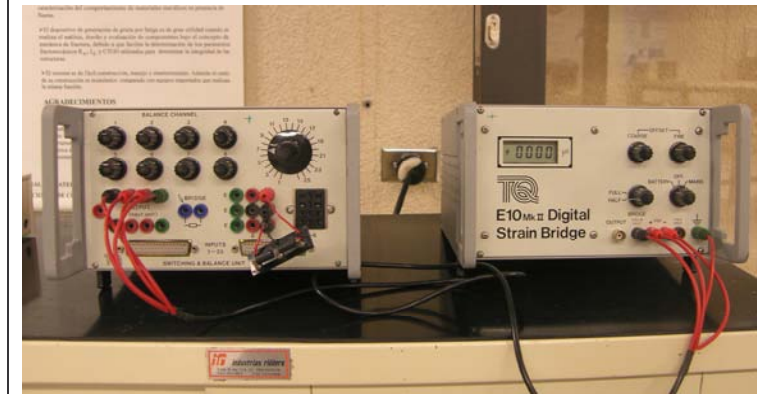
**S** = Distancia entre los apoyos de la probeta.

Una vez calculada la carga de prefisurado esta se consigna en la tabla de datos.

#### 4.4. APLICACIÓN DE LA CARGA DE PREFISURADO

Para medir la fuerza que se esta aplicando a la probeta se utilizan Strain Gauge FLA-6-11 que están conectados a los aplicadores de carga, ver figura 3 y 4. Los Strain Gauge a su vez debe conectarse a los medidores de deformación E10 y E18 ver figura 5; estos registran la deformación que sufren los aplicadores de carga medida que se aprietan las tuercas.

**Figura 5. Medidores de deformación E10 Y E18**



Los aplicadores de carga del equipo han sido previamente calibrados para tener una relación entre la deformación que presentan y la carga que están aplicando; esta relación se presenta en la tabla 1

**Tabla 1 Relación deformación carga para el aplicador de carga a flexión.**

APLICADOR DE CARGA			
Flexión		Tensión	
Deformación (mm/mm)	Carga (N)	Deformación (mm/mm)	Carga (N)
0	0	0	0
36.8	525.2	10.7	547.7
59.8	1034.8	16.7	1034.7
81.8	1538.8	24	1529
106.5	2051	30.7	2062.7
121.8	2541.3	37.7	2542.7
149	3054.5	46	3044
172.5	3544.5	51.3	3559.3
194.5	4068.3	61.7	4155.3
220	4536	66.3	4544.7
241.8	5041	75	5121.7
260.8	5541.5	82	5585.7
288.3	6048	88	6045.3

#### 4.5 GENERACIÓN DE GRIETA

Una vez se ha calculado y aplicado la carga de prefisurado se pone en marcha el equipo y se procede a generar la grieta. Se recomienda trabajar con el motor a una velocidad superior a las 500 rpm para evitar el sobrecalentamiento de este; una vez se a puesto en marcha el motor se activa el cronometro para medir el tiempo que toma el generar la grieta del tamaño que se busca; el tiempo de cada probeta se registra en la tabla de datos; para posteriormente realizar una grafica de crecimiento de grieta vs tiempo.

El método utilizado para controlar el crecimiento de grieta es por inspección visual, que se hace por medio de una lupa, con la cual se observa el vértice de la entalla hasta que se produce la grieta y esta llegue a la marca hecha previamente.

#### 4.6 CALCULO DEL VALOR DE TENACIDAD A LA FRACTURA $K_{Ic}$

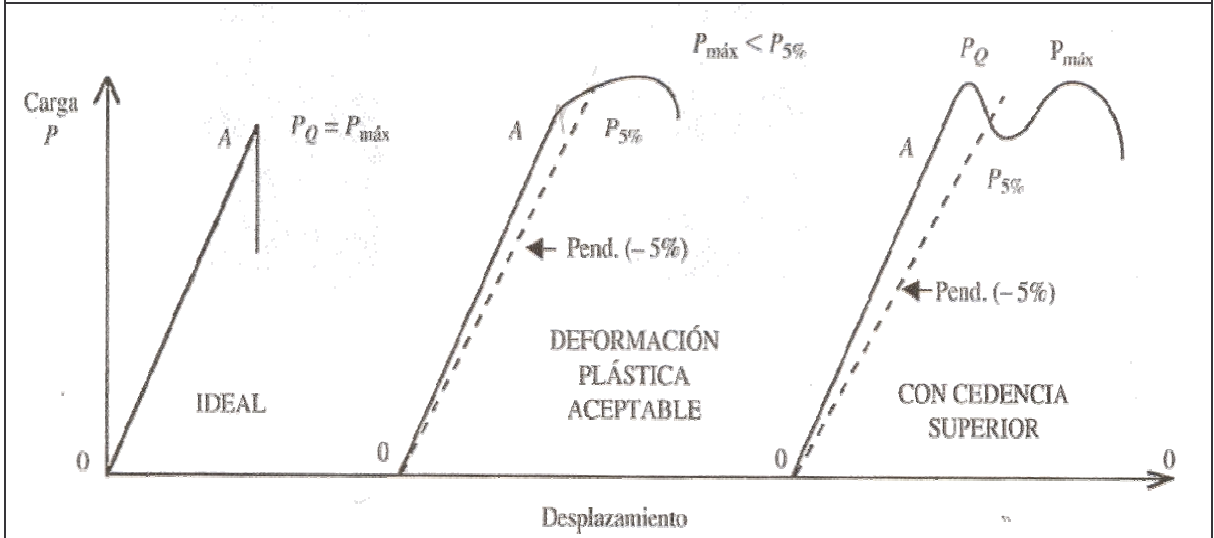
Una vez se ha generado la grieta en las probetas, estas se llevan a la maquina universal de ensayos UTS 200.3, donde se someten a cargas de flexión o tensión hasta que ocurre la fractura.

Se recomienda que la velocidad de aplicación de la carga no sea superior a 2 mm/min. Con los datos obtenidos de los ensayos a flexión y tensión se realiza un grafico carga vs. alargamiento, del análisis de esta grafica se obtiene el valor de carga  $P_Q$  "en el caso ideal , la carga  $P_Q$  es igual a la carga máxima registrada  $P_{max}$ . Cuando existe cierta plasticidad el valor de  $P_Q$  es obtenido de la intersección de una recta con una pendiente disminuida en un 5% con relación a la recta OA, que es la parte inicial de la curva carga vs. Desplazamiento; a esta carga se le denomina **P5%**. Cuando se presenta el fenómeno de cedencia superior, es decir que hay un máximo local en la curva P contra desplazamiento antes del máximo absoluto,  $P_Q$  será la carga máxima registrada antes de **P5%**."<sup>16</sup>

---

<sup>16</sup> GONZÁLES, J. Mecánica de fractura; Segunda edición . Noriega editores S.A. 2004. p72

Figura 8. Curvas típicas carga vs. desplazamiento en pruebas de tenacidad a la fractura



El valor obtenido de  $P_Q$  se utilizara posteriormente en las ecuaciones que proporciona la ASTM para calcular el valor de la tenacidad a la fractura al que llamaremos  $K_Q$  hasta que se compruebe que los ensayos sean validos, cuando esto se compruebe  $K_Q$  se llamara  $K_{Ic}$

#### 4.6.1. Calculo de la tenacidad a la fractura $k_{Ic}$ para probetas a flexión

$$K_Q = \left( \frac{P_Q S}{B(W)^{3/2}} \right) * f(a/W) \quad (5)$$

Donde:

**B** = Espesor de la probeta (cm)

**P<sub>Q</sub>** = Carga determinada por la grafica Carga vs. Alargamiento expresada en KN

**W** = Altura de la probeta (cm)

**S** = Distancia entre los apoyos de la probeta (cm)

**a** = Longitud de la entalla más la grieta generada. (cm)

para facilitar el calculo de la función  $f(a/W)$  la norma ASTM E 399-90 proporciona la tabla 4 que relaciona el cociente  $a/W$  con el valor de la función  $f(a/W)$ .

Tabla 4 Relaciones entre  $a/w$  y  $f(a/w)$  probeta a flexión.

To facilitate calculation of $K_Q$ , values of $f(a/W)$ are tabulated in the following table for specific values of $a/W$ .			
Bend Specimens			
$a/W$	$f(a/W)$	$a/W$	$f(a/W)$
0.450	2.29	0.500	2.66
0.455	2.32	0.505	2.70
0.460	2.35	0.510	2.75
0.465	2.39	0.515	2.79
0.470	2.43	0.520	2.84
0.475	2.46	0.525	2.89
0.480	2.50	0.530	2.94
0.485	2.54	0.535	2.99
0.490	2.58	0.540	3.04
0.495	2.62	0.545	3.09
		0.550	3.14

ASTM. Annual Book of ASTM Standard: E 399-90 “Estándar Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials”. Estados Unidos: ASTM, 1986. p. 14.

El paso final es comprobar que los ensayos realizados sean validos para esto se debe cumplir que la relación  $P_{max}/P_Q$  de un valor  $\leq$  de 1.1. y el valor de

$2.5 \left( \frac{K_Q}{\sigma_y} \right)^2$  debe ser menor que el espesor de la probeta.

#### 4.6.2. Calculo de la tenacidad a la fractura $k_{Ic}$ para probetas a tensión

$$K_Q = (P_Q / B * \sqrt{W}) * f(a/W) \quad (6)$$

Donde:

$P_Q$ = carga determinada por la grafica Carga vs. Alargamiento expresada en KN

$B$  = Espesor de la probeta (cm.).

$W$  = Longitud de la probeta al centro del agujero (cm.).

$a$  = Longitud desde el centro de los agujeros hasta la punta de la grieta (cm.).

Para obtener el valor de  $f(a/W)$  se recurre a la tabla 5 que presenta la norma ASTM E399-90

Tabla 5 Relaciones entre  $a/w$  y  $f(a/w)$  probeta a tracción.

A4.5.3.1 To facilitate calculation of $K_Q$ , values of $f(a/W)$ are tabulated below for specific values of $a/W$ .			
Compact Specimens			
$a/W$	$f(a/W)$	$a/W$	$f(a/W)$
0.450	8.34	0.500	9.66
0.455	8.46	0.505	9.81
0.460	8.58	0.510	9.96
0.465	8.70	0.515	10.12
0.470	8.83	0.520	10.29
0.475	8.96	0.525	10.45
0.480	9.09	0.530	10.63
0.485	9.23	0.535	10.80
0.490	9.37	0.540	10.98
0.495	9.51	0.545	11.17
		0.550	11.36

ASTM. Annual Book of ASTM Standard: E 399-90 “Estándar Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials”. Estados Unidos: ASTM, 1986. p. 16.

El paso final es comprobar que los ensayos realizados sean validos para esto se debe cumplir que la relación  $P_{max}/P_Q$  de un valor  $\leq$  de 1.1. y el valor de

$2.5 \left( \frac{K_Q}{\sigma_y} \right)^2$  debe ser menor que el espesor de la probeta.





## 1. RESULTADOS

Probetas a flexión					
Probeta	Tiempo de prefisurado (min)	Longitud de grieta (mm)	Carga de prefisurado (N)	Velocidad del motor (Rpm)	Tenacidad a la fractura ( $Mpa\sqrt{m}$ )

Probetas a tensión					
Probeta	Tiempo de prefisurado (min)	Longitud de grieta (mm)	Carga de prefisurado (N)	Velocidad del motor (Rpm)	Tenacidad a la fractura ( $Mpa\sqrt{m}$ )



**Guía de laboratorio – Determinación De La Tenacidad A La Fractura  $K_{Ic}$  En Aceros**  
Mediante Crecimiento De Grieta Por Fatiga  
**Grupo Ciencia e Ingeniería de Materiales**

## **REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS**

ANGLADA, MJ. LLANE, L.M Y MATEO. MN. Fractura de materiales. Barcelona España: Edición UPC, 2002.

ASTM. Annual Book of ASTM Standard: E 399-90 “Estándar Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials”. Estados Unidos: ASTM, 1986.

CAÑIZALES, Juan Pablo; TORO, Álvaro José; JARAMILLO SUÁREZ, Héctor Enrique; ALBA DE SÁNCHEZ, Nelly Cecilia. Introducción a la Mecánica de la Fractura y Análisis de Fallas. Cali: Universidad Autónoma de Occidente, 2006.

GONZÁLES, J. Mecánica de fractura; Segunda edición . Noriega editores S.A. 2004.